

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE
CONCENTRATION RÉSEAUX DE TÉLÉCOMMUNICATIONS
M. Sc. A.

PAR
Nabih ALLOUNE

CONCEPTION ET ANALYSE DES RÉSEAUX SANS FILTRE POUR APPLICATIONS
SOUS-MARINES

MONTREAL, LE 1^{er} AOÛT 2016



Nabih Alloune, 2016



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Christine Tremblay, directrice de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. François Coallier, président du jury
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

M. François Gagnon, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 14 JUILLET 2016

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ma directrice de projet, Christine Tremblay, pour m'avoir offert la possibilité de travailler sur le projet sans filtre, et aussi pour sa disponibilité, son soutien, son encadrement et sa patience durant tout le déroulement de ce travail.

Je remercie aussi Md. Nooruzzaman, Feriel Nabet, Émile Archambault, l'équipe de KTH et les collaborateurs Michel Bélanger et Paul Littlewood de chez Ciena pour l'aide, le soutien et les remarques qui ont permis de compléter cette maîtrise avec succès.

Je tiens également à remercier mes parents, Abdessetar et Ghania, mes sœurs et mon frère qui m'ont toujours soutenu pour aller de l'avant et qui m'ont procuré la force de le faire.

Par la même occasion, je remercie également mes oncles Merabai Madani et Youcef ainsi que mon ami Djamel Chaabane pour leur soutien, particulièrement, durant les moments difficiles.

Un grand merci à toute ma grande famille et à tous mes amis qui m'encourageaient continuellement, surtout Hamidi Mourad.

Enfin, je tiens également à remercier l'ensemble du corps enseignant de l'École de technologie supérieure pour toutes les connaissances théoriques et pratiques acquises lors de ma maîtrise.

CONCEPTION ET SIMULATION DES RÉSEAUX OPTIQUES SANS FILTRE POUR APPLICATIONS SOUS-MARINES

Nabih ALLOUNE

RÉSUMÉ

Les commutateurs sélectifs en longueurs d'onde (WSS) ne peuvent pas encore être déployés dans les unités de branchement (BU) immergées des liaisons sous-marines, ce qui limite la flexibilité des réseaux optiques sous-marins. À cet égard, l'architecture de réseau optique sans filtre, qui est basée sur des nœuds équipés de transpondeurs cohérents et de diviseurs optiques passifs et qui a déjà été proposée pour des applications terrestres, peut être considérée comme une solution prometteuse pour les applications sous-marines. Dans ce mémoire, des solutions architecturales sans filtre sont proposées et évaluées pour trois topologies physiques de réseau optique sous-marin. Les solutions sont comparées à des solutions conventionnelles à WSS en termes de coûts, de consommation de longueur d'onde et de spectre. Il est aussi démontré que l'architecture sans filtre peut apporter d'importantes économies pour les équipements de terminal et la consommation de spectre, par rapport à un réseau conventionnel, en offrant la possibilité de réassigner dynamiquement les transpondeurs et le spectre entre les différentes connexions optiques d'un réseau sous-marin longue distance.

Mots clés : Réseaux sous-marins, réseaux sans filtre, routage et assignation de longueur d'onde (RWA), routage et assignation de spectre (RSA), agilité.

DESIGN AND SIMULATION OF FILTERLESS OPTICAL NETWORKS FOR SUBMARINE APPLICATIONS

Nabih ALLOUNE

ABSTRACT

Wavelength selective switches (WSS) cannot yet be deployed in the submerged branching units (BUs) of submarine cable line systems, which limits the flexibility of undersea optical networks. In this regard, the filterless network architecture, which is based on coherent transponders and passive optical splitters and combiners at nodes and has already been proposed for terrestrial applications, can be considered as a promising solution for submarine applications. In this thesis, filterless architectural solutions are proposed and evaluated for three submarine network topologies. The solutions are compared with conventional active photonic switching solutions based on WSS in terms of cost, wavelength consumption (Routing and Wavelength Assignment, RWA), and spectrum assignment (Routing and Spectrum Assignment, RSA). It is also shown that the filterless architecture can bring significant savings in terms of terminal equipment and spectrum consumption in submarine networks with time-varying traffic by dynamically adjusting the number of transceivers and the spectrum based on the traffic variations.

Keywords: Submarine networks, filterless networks, routing and wavelength assignment (RWA), routing and spectrum assignment (RSA), agility.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 RÉSEAUX OPTIQUES SOUS-MARINS.....	5
1.1 Systèmes sous-marins conventionnels.....	5
1.2 Évolution des réseaux optiques sous-marins : du WDM aux systèmes cohérents	8
1.2.1 Multiplexage de longueur d'onde	9
1.2.2 Format de modulation	11
1.2.3 Systèmes cohérents	14
1.3 Contraintes des réseaux sous-marins	15
1.4 Architecture sans filtre.....	15
1.4.1 Exemple d'un réseau sans filtre terrestre	16
1.4.2 Avantage des réseaux sans filtre	20
1.5 Le choix des réseaux sans filtre dans le monde sous-marin	21
CHAPITRE 2 PLATEFORME DE CONCEPTION ET DE SIMULATION.....	25
2.1 Introduction.....	25
2.2 Ensemble des outils de conception des réseaux sans filtre sous-marins.....	26
2.3 Génération des entrées de la couche physique.....	26
2.3.1 Outil Microsoft Visual Studio®.....	27
2.3.2 Présentation de l'outil développé sous <i>Microsoft Visual Studio</i>	27
2.4 Conception de réseau sans filtre	29
2.4.1 Outils de conception MATLAB®	29
2.4.2 Adaptation des outils de conception MATLAB®	30
2.4.2.1 Interconnexion des arbres de fibre optique	31
2.4.2.2 Routage et assignation de longueurs d'onde	37
2.4.3 Assignation du spectre pour la solution sans filtre	38
2.5 Adaptation des outils.....	40
2.5.1 Création des nouveaux arbres	40
2.5.2 Portée du système de transmission et régénération.....	42
2.5.3 Matrice de trafic	44
2.6 Calcul du coût des solutions conventionnelle et sans filtre	46
2.7 <i>Ciena Optical Planner</i> TM	50
2.7.1 Interface d'intégration de données MATLAB® dans <i>Ciena Optical Planner</i> TM	51
CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET ANALYSES	53
3.1 Réseau sous-marin <i>long haul</i>	53
3.1.1 Solution sans filtre proposée.....	55
3.1.2 Analyse des coûts.....	55
3.1.3 Analyse de capacité.....	58
3.1.3.1 Limite de capacité	59

	3.1.3.2	Assignation du spectre	60
	3.1.4	Evolution des coûts	62
3.2		Réseau sous-marin régional	63
	3.2.1	Solution sans filtre proposée	65
	3.2.2	Analyse des coûts	66
	3.2.3	Analyse de capacité	68
	3.2.3.1	Limite de capacité	70
	3.2.3.2	Assignation du spectre	71
	3.2.4	Évolution des coûts	72
3.3		Réseau sous-marin en anneau	74
	3.3.1	Solution sans filtre proposée	75
	3.3.2	Stratégie de distribution des demandes dans la topologie en anneau	78
	3.3.3	Analyse des coûts	79
	3.3.4	Analyse de capacité	81
	3.3.4.1	Limite de capacité	83
	3.3.4.2	Assignation de spectre	84
	3.3.5	Évolution des coûts	86
3.4		Conclusion	88
CHAPITRE 4		Analyse de performance des réseaux sans filtre sous-marins sous un trafic dynamique	89
4.1		Réseau sous-marin avec trafic dynamique et économie de ressources	89
4.2		Modèle et formulation mathématique de calcul du nombre de transpondeurs et le nombre de longueurs d'onde en mode dynamique	93
	4.2.1	Calcul des matrices de trafic instantanées.	93
	4.2.2	Calcul du nombre de transpondeurs	94
	4.2.3	Calcul du nombre de longueurs d'onde	98
4.3		Résultats et analyses	99
	4.3.1	Scénarios de variation de trafic	99
	4.3.2	Résultats en termes d'économies de transpondeurs et de longueurs d'onde dans un trafic dynamique	100
	4.3.2.1	Réseau sous-marin <i>long haul</i>	100
	4.3.2.2	Réseau sous-marin régional	103
	4.3.2.3	Réseau sous-marin en anneau	108
4.4		Conclusion	113
CONCLUSION		117
ANNEXE I		EXEMPLE DE L'EN-TÊTE D'UN FICHIER CSV DE L'INTERFACE D'INTÉGRATION DE DONNÉES	119
ANNEXE II		SCHÉMA DE L'ALGORITHME D'INTERCONNEXION D'ARBRE AVEC LES PROGRAMMES MATLAB® ASSOCIÉS	121
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		123

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Caractéristiques typiques d'un système de transmission sous-marin à 100 Gbit/s.....35
Tableau 2.2	Exemple de données pour le calcul des périodes de trafic.....46
Tableau 2.3	Prix unitaire des équipements terminaux des réseaux sous-marins46
Tableau 2.4	Prix unitaire des équipements de ligne des réseaux sous-marins47
Tableau 3.1	Trafic total entre les 6 stations du réseau sous-marin <i>long haul</i> (longueurs d'onde de 100 Gbit/s) Total : 134 demandes (Trafic total = 13.4 Tbit/s).....54
Tableau 3.2	Coûts relatifs des équipements de terminal des solutions sans filtre et conventionnelle pour le réseau <i>Long Haul</i> par rapport à un modem QPSK à 100 Gbit/s.....56
Tableau 3.3	Coûts relatifs des équipements de ligne des solutions sans filtre et conventionnelle pour le réseau <i>long haul</i>57
Tableau 3.4	Nombre de transpondeurs et consommation en longueur d'onde des solutions conventionnelle et sans filtre pour le réseau <i>long haul</i>58
Tableau 3.5	Trafic total entre les 15 stations (en nombre de longueurs d'onde de 100 Gbit/s)65
Tableau 3.6	Coûts relatifs des équipements de terminal des solutions sans filtre et conventionnelle pour le réseau <i>régional</i> par rapport à un modem QPSK à 100 Gbit/s.....66
Tableau 3.7	Coûts relatifs des équipements de ligne des solutions sans filtre et conventionnelle pour le réseau régional67
Tableau 3.8	Nombre de transpondeurs et consommation en longueur d'onde des solutions conventionnelle et sans filtre pour le réseau régional69
Tableau 3.9	Trafic total entre les 11 stations pour la topologie du réseau sous-marin en anneau (en nombre de longueurs d'onde de 100 Gbit/s).....75

Tableau 3.10	Coûts relatifs des équipements de terminal des solutions sans filtre et conventionnelle pour le réseau en anneau par rapport à un modem QPSK à 100 Gbit/s	80
Tableau 3.11	Coûts relatifs des équipements de ligne des solutions sans filtre et conventionnelle pour le réseau en anneau	81
Tableau 3.12	Nombre de transpondeurs et consommation en longueur d'onde des solutions conventionnelle et sans filtre pour le réseau en anneau	82
Tableau 4.1	Matrice de trafic unitaire du réseau LH avec les groupes de demandes	96

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Les éléments d'un réseau de télécommunication sous-marin.....6
Figure 1.2	(a) Vue externe du BU (Chesnoy, 2002); (b) Différente configuration du câble optique à l'intérieur d'un BU8
Figure 1.3	Évolution des réseaux sous-marins9
Figure 1.4	Liaison sous-marine WDM amplifiée.....10
Figure 1.5	Spectre d'une fibre11
Figure 1.6	Constellation des formats de modulation (a) OOK; (b) BPSK; (c) QPSK...12
Figure 1.7	Graphe montrant la distance maximale possible sans régénération selon le format de modulation13
Figure 1.8	Récepteur cohérent.....14
Figure 1.9	Topologie du réseau Allemand à 7 nœuds17
Figure 1.10	Solution MATLAB® du réseau Allemand à 7 Noeuds17
Figure 1.11	Solution sans filtre à trois arbres de fibres optiques du réseau allemand à 7 nœuds démontrant la pleine connectivité faite à partir de coupleurs passifs et de fibres optiques. Chacune des couleurs représente un arbre de fibres optiques distinct19
Figure 1.12	Nombre fixe de canaux insérés et extraits dans une unité de branchement avec OADM22
Figure 2.1	Ensemble des outils de conception des réseaux sans filtre sous-marins.....26
Figure 2.2	Topologie physique dessinée à l'aide du programme de génération des entrées de la couche physique.....27
Figure 2.3	Données topologiques obtenues à partir du programme <i>Microsoft Visual Studio®</i>28
Figure 2.4	Les différentes étapes de l'algorithme génétique.....32

Figure 2.5	Évolution de la valeur minimale, moyenne et maximale du <i>fitness</i> en fonction du nombre d'itérations.....	34
Figure 2.6	Assignation de longueur d'onde dans un réseau conventionnel.....	36
Figure 2.7	Assignation de longueurs d'onde dans un réseau sans filtre	36
Figure 2.8	Spectre total occupé par deux canaux DP-QPSK à 100 Gbit/s dans un réseau:	39
Figure 2.9	Solution de l'interconnexion d'arbres avant la modification des algorithmes (un seul arbre)	40
Figure 2.10	Solution de l'interconnexion d'arbres après modification des algorithmes (2 arbres)	41
Figure 2.11	Solution sans filtre : (a) sans régénération (b) avec régénération.	42
Figure 2.12	Matrice de trafic unitaire.....	44
Figure 2.13	Matrice de trafic unitaire après régénération au nœud 3.....	44
Figure 2.14	Exemple d'une matrice de trafic initiale TM^1 pour un réseau composé de deux nœuds	45
Figure 2.15	Configuration d'un nœud terrestre : (a) sans filtre (b) conventionnelle	47
Figure 2.16	Calcul des coûts pour un nœud terrestre dans le cas sans filtre	48
Figure 2.17	Calcul des coûts pour un nœud terrestre dans le cas d'une solution conventionnelle	50
Figure 2.18	Exemple de réseau sur <i>Ciena Optical Planner</i> TM	51
Figure 3.1	Architecture conventionnelle à trois paires de fibres (3 FP) pour la topologie du réseau sous-marin <i>long haul</i> , Tirée de	53
Figure 3.2	Solution sans filtre pour la topologie du réseau sous-marin <i>long haul</i>	55
Figure 3.3	Les limites de la capacité des solutions sous-marines sans filtre et conventionnelle pour le réseau <i>long haul</i>	60
Figure 3.4	Différence d'évolution de la consommation en nombre de FSU pour les solutions sans filtre avec grille fixe et élastique du réseau <i>long haul</i>	61
Figure 3.5	Comparaison des coûts des terminaux des solutions sans filtre et conventionnelle en fonction du trafic total pour le réseau <i>long haul</i>	62

Figure 3.6	Comparaison des coûts des terminaux des solutions sans filtre et conventionnelle en fonction du trafic total pour le réseau <i>long haul</i>	63
Figure 3.7	Architecture conventionnelle à trois paires de fibres (3 FP) pour la topologie du réseau sous-marin <i>régional</i> . Tirée de.....	64
Figure 3.8	Solution sans filtre pour la topologie du réseau sous-marin <i>régional</i>	66
Figure 3.9	Les limites de la capacité des solutions sous-marines sans filtre et conventionnelle du réseau sous-marin régional.....	71
Figure 3.10	Différence d'évolution de la consommation en nombre de FSU pour une solution sans filtre avec et sans grille du réseau sous-marin régional	71
Figure 3.11	Comparaison des coûts des terminaux des solutions sans filtre et conventionnelles pour diverses périodes de trafics du réseau sous-marin régional	73
Figure 3.12	Comparaison des coûts des terminaux des solutions sans filtre et conventionnelles élastiques pour diverses périodes de trafic du réseau régional	73
Figure 3.13	Architecture conventionnelle à trois paires de fibres (3 FP) pour la topologie du réseau sous-marin <i>en anneau</i>	74
Figure 3.14	Solution sans filtre 1 pour la topologie du réseau sous-marin en anneau avec deux paires de fibres : (1 ^{re} PF) régénération au niveau des stations 1 et 7. (2 ^e PF) régénération au niveau des stations 4 et 9	76
Figure 3.15	Solution sans filtre 2 pour la topologie du réseau sous-marin en anneau avec deux paires de fibres : (1 ^{re} PF) début de l'arbre à la 1 ^{re} station, (2 ^e PF) début de l'arbre à la station 7	77
Figure 3.16	Exemple de distribution des demandes dans les matrices de trafic de la solution sans filtre 1 pour la topologie du réseau sous-marin en anneau (à gauche, matrice de trafic de la 1 ^{re} PF. À droite, matrice de trafic de la 2 ^e PF).....	78
Figure 3.17	Les limites de capacité des solutions sous-marines sans filtre et conventionnelle pour la topologie du réseau sous-marin en anneau.....	83
Figure 3.18	Différence d'évolution de la consommation en nombre de FSU pour la solution sans filtre 1 avec et sans grille pour la topologie du réseau sous-marin en anneau	85

Figure 3.19	Différence d'évolution de la consommation en nombre de FSU pour la solution sans filtre 2 avec et sans grille pour la topologie du réseau sous-marin en anneau	86
Figure 3.20	Comparaison des coûts des terminaux des solutions sans filtre et conventionnelle pour diverses périodes de trafics pour la topologie du réseau sous-marin en anneau	87
Figure 3.21	Comparaison des coûts des terminaux des solutions sans filtre et conventionnelle élastique pour diverses périodes de trafics pour la topologie du réseau sous-marin en anneau	88
Figure 4.1	variation de trafic d'un réseau donné sur une période de 24 heures.....	90
Figure 4.2	Exemple d'économie des ressources dans les réseaux sous-marins sans filtre (a) économie de transpondeurs et de longueurs d'onde (b) économie de longueurs d'onde uniquement.	91
Figure 4.3	Exemple de réduction des ressources dans les réseaux sous-marins sans filtre (a) un transpondeur est économisé au nœud 1 lorsque les demandes passent par le nœud 2 sans régénération; (b) trois transpondeurs sont économisés au niveau des nœuds 1 et 2 lorsque les demandes sont régénérées au nœud 5.....	92
Figure 4.4	Algorithme pour générer les matrices de trafic temps réel	93
Figure 4.5	Algorithme pour le calcul du nombre de transpondeurs dans un scénario de trafic dynamique.....	95
Figure 4.6	Création de la matrice de trafic avec les plus grands groupes (TMBG).....	97
Figure 4.7	Algorithme pour le calcul du nombre de longueurs d'onde dans un scénario de trafic dynamique	98
Figure 4.8	Scénarios de variation de trafic d'un réseau donné sur une période de 24 heures avec 5 variations différentes.....	100
Figure 4.9	Nombre de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre du réseau <i>LH</i> en fonction du trafic.....	101
Figure 4.10	Pourcentage de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre du réseau <i>LH</i>	101
Figure 4.11	Nombre de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre du réseau <i>LH</i>	102

Figure 4.12	Pourcentage de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre du réseau <i>LH</i>	103
Figure 4.13	Nombre de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre avec régénération du réseau régional	103
Figure 4.14	Pourcentage de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre avec régénération du réseau régional.....	104
Figure 4.15	Nombre de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre sans régénération du réseau régional	105
Figure 4.16	Pourcentage de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre sans régénération du réseau régional	105
Figure 4.17	Nombre de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre avec régénération du réseau régional.....	106
Figure 4.18	Pourcentage de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre avec régénération du réseau régional	107
Figure 4.19	Nombre de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre sans régénération du réseau régional	107
Figure 4.20	Pourcentage de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre sans régénération du réseau régional.....	108
Figure 4.21	Nombre de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre avec 2 régénérateurs par paire de fibres du réseau en anneau.....	109
Figure 4.22	Pourcentage de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre avec 2 régénérateurs par paire de fibres du réseau en anneau	109
Figure 4.23	Nombre de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre sans régénération du réseau en anneau	110
Figure 4.24	Pourcentage de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre sans régénération du réseau en anneau	110
Figure 4.25	Nombre de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre avec 2 stations de régénération par paire de fibres du réseau en anneau.....	111
Figure 4.26	Pourcentage de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre avec 2 stations de régénération par paire de fibres du réseau en anneau	112

Figure 4.27	Nombre de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre sans régénération du réseau en anneau	112
Figure 4.28	Pourcentage de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre sans régénération du réseau en anneau.....	113

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASE	Amplified spontaneous emission
BU	Branching Unit
DEMUX	Demultiplexer
DP-QAM	Dual Polarization Quadrature Amplitude Modulation DP-
DP -BPSK	Dual Polarization Binary Phase Shift Keying
DP-QPSK	Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying
DSP	Digital Signal Processing
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium-doped fiber amplifiers
FEC	Forward error correction
FP	Fiber Pair
FSU	Frequency Slot Unit
GA	Genetic algorithm
ITU	International Telecommunication Union
MUX	Multiplexer
MTBF	Mean time between failures
NMS	Network management system
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer
OOK	On-Off Keying
OSI	Open systems Interconnection
OXC	Optical cross connect
PDM	Polarization Division Multiplexing
PFE	Power Feed Equipment
RBU	Reconfigurable Branching Unit
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer
RSA	Routing and Spectrum Assignment
RWA	Routing and Wavelength Assignment

SLTE	System Line terminal Equipment
SUI	Spectrum Utilization Improvement
WB	Wavelength Blocker
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WSS	Wavelength Selective Switch

INTRODUCTION

La quantité de données échangées dans le monde ne cesse d'augmenter au fil du temps. Les services informatiques, la vidéo ultra haute définition et les données sur téléphone mobile, pour ne citer que ceux-là, sont devenus courants pour le grand public. La capacité qu'offrent les réseaux optiques actuellement avec l'avènement des nouveaux formats de modulation permet de transporter des données de l'ordre de téraoctets par seconde (Cisco, 2015).

Face à cette croissance constante du trafic, les réseaux optiques terrestres et sous-marins, qui peuvent supporter le trafic actuel, doivent continuellement être mis à niveau afin d'augmenter leur capacité. D'après (Cisco, 2015), le trafic IP mondial annuel est estimé à 1 zettaoctet par année (10^9 téraoctets) en 2016 et dépassera les 2 zettaoctets en 2019, ce qui représentera deux fois plus de données échangées qu'en 2016. Déployer de nouvelles liaisons sous-marines à très haute capacité consomment beaucoup de temps et d'argent en plus de requérir l'utilisation de nouvelles technologies ou technique, par exemple l'assignation flexible de spectre où il est possible de déployer des canaux avec une grille élastique au lieu d'une grille ITU-T simple à 50 GHz, dans le but d'exploiter plus efficacement le spectre de la fibre optique. Le passage vers ces nouvelles technologies impose de changer une partie des équipements déjà déployés comme les commutateurs sélectifs en longueurs d'onde (WSS) à grille fixe déployés dans les nœuds terrestres. À cette contrainte s'ajoute une difficulté propre aux réseaux sous-marins : certains équipements comme les WSS ne sont pas qualifiés pour être déployés sous l'eau.

L'architecture de réseaux sans filtre proposée il y a quelques années pour des applications terrestres pourrait être une solution intéressante pour les applications sous-marines. En effet, les réseaux sans filtre offrent plus de flexibilité que les réseaux conventionnels, car ils ne comportent aucun équipement de commutation dans la partie ligne du réseau, mais uniquement des coupleurs passifs qui sont déjà qualifiés pour un déploiement sous l'eau. En raison de cette caractéristique, les réseaux sans filtre pourraient être une solution moins coûteuse pour les câbles optiques sous-marins. Dans ces réseaux, l'agilité est livrée par les

transpondeurs cohérents qui se trouvent aux extrémités du réseau. De plus, le contrôle du réseau se fait uniquement à partir de ses extrémités, c'est-à-dire au niveau des nœuds terrestres, et les coupleurs passifs qui sont utilisés pour interconnecter les différents liens sont déjà qualifiés pour être déployés sous l'eau.

Les réseaux sans filtre ont déjà été étudiés pour le cas terrestre (Archambaut, 2010). Les résultats ont démontré qu'il est possible d'économiser sur le coût d'équipements. Dans le cadre de ce projet, l'étude a porté sur les réseaux sous-marins de type « tronc et branche » et les réseaux en anneau. Pour ces deux types de réseau, l'étude a consisté à adapter la plateforme de conception et de simulation des réseaux sans filtre pour des applications sous-marines. L'adaptation a consisté à prendre en considération que la portée des systèmes sous-marins est plus grande que celle des systèmes terrestres, et que certains équipements comme le WSS et l'égaliseur de gain variable ne sont pas qualifiés pour être déployés sous l'eau. Des analyses comparatives avec des réseaux conventionnels à WSS ont été faites en termes de coûts, consommation de longueur d'onde (*Routing and wavelength assignment*, RWA) et de spectre (*Routing and spectrum assignment* RSA). L'agilité qu'offrent les réseaux sans filtre a été démontrée dans une situation de trafic dynamique où l'on observe des variations de demandes selon l'heure du jour et le décalage horaire entre les nœuds du réseau. En effet, le trafic journalier n'atteint pas son maximum en même temps pour des nœuds terrestres qui appartiennent à des fuseaux horaires différents, d'où la possibilité de réassigner dynamiquement les transpondeurs et le spectre afin d'économiser en nombre de transpondeurs et de longueurs d'onde sans avoir à changer les équipements du réseau sans filtre.

Les contributions de ce travail ont touché le développement et l'adaptation des outils de conception et des algorithmes de calcul, la simulation et l'analyse des résultats. Les résultats ont fait l'objet d'une déclaration d'invention transférée à Ciena et 5 publications avec comité de lecture :

Déclaration d'invention :

Nooruzzaman, M.; Alloune, N.; Tremblay, C.; L.; Littlewood, P.; Bélanger, M. P. “*Network Resource Optimization With Time Varying Traffic In A Filterless Network Using Coherent Optical Transmission*,” 12-2015.

Articles:

Furdek, M.; Muhammad, A.; Zervas, G.; Alloune, N.; Tremblay, C.; Wosinska, L., “*Programmable Filterless Network Architecture Based on Optical White Boxes*” *Optical Network Design and Modeling (ONDM) 2016*, Cartagena, Spain, Mai 9-12, 2016.

Nooruzzaman, M.; Nabet, F.; Alloune, N.; Archambault, É.; Tremblay, C.; Furdek, M.; Chen, J.; Wosinska, L.; Littlewood, P.; Bélanger, M. P., “*Resource Savings in Gridless Coherent Submarine Networks with Filterless Architectures*,” *SubOptic’16*, Dubai, UAE, Avril 18-21, 2016, *Paper NA08*.

Archambault, É.; Alloune, N.; Furdek, M.; Xu, Z.; Tremblay, C.; Muhammad, M.; Chen, J.; Wosinska, L.; Littlewood, P.; Bélanger, M. P., “*Routing and Spectrum Assignment in Elastic Filterless Optical Networks*,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1-15, 2016. DOI: 10.1109/TNET.2016.2528242.

Nooruzzaman, M.; Alloune, N.; Nabet, F.; Xu, Z.; Archambault, E.; Tremblay, C.; Furdek, M.; Chen, J.; Wosinska, L.; Littlewood, P.; Belanger, M. P., “*Flexible Architecture for Coherent Undersea Networks*,” in *Proc. Optical Network Design and Modeling (ONDM) 2015*, Pisa, Italy, Mai 11-14, 2015, 68-73.

Nooruzzaman, M.; Alloune, N.; Nabet, F.; Archambault, E.; Tremblay, C.; Furdek, M.; Chen, J.; Wosinska, L.; Littlewood, P.; Belanger, M. P., “*Agile Filterless Submarine Ring Networks*,” in *Proc. 17th International Network Strategy and Planning Symposium (Networks) 2016*, Montreal, Canada, Septembre 26-28, 2016.

Les chapitres du mémoire sont structurés comme suit : le premier chapitre présente les réseaux sous-marins conventionnels et le concept de réseau sans filtre tel que développé pour des applications terrestres. Le chapitre 2 décrit les outils et les algorithmes développés ou adaptés pour la conception et l’analyse de réseaux sans filtre sous-marins. Le chapitre 3 présente les résultats des analyses de coûts, de limite de capacité et de consommation de longueurs d’onde et de spectre pour trois topologies de réseau sous-marins (*long haul*, régionale et en anneau). Le dernier chapitre est consacré au modèle créé pour exploiter le décalage horaire entre les différents nœuds et présente une analyse de performance dans

laquelle on montre les économies possibles en termes de nombre de longueurs d'onde et de transpondeurs dans un scénario de trafic dynamique.

CHAPITRE 1

RÉSEAUX OPTIQUES SOUS-MARINS

Dans cette partie, les différents équipements qui composent les réseaux optiques sont décrits. Par convention, un réseau optique est appelé conventionnel s'il contient des équipements qui filtrent l'information, alors qu'un réseau optique est appelé sans filtre s'il repose sur une architecture passive de nœuds. Pour les deux familles, l'attention est portée sur les réseaux sous-marins. Bien que les réseaux sous-marins présentent beaucoup de similitudes avec les réseaux terrestres, il existe néanmoins des contraintes liées au milieu sous-marin.

1.1 Systèmes sous-marins conventionnels

Les réseaux optiques sous-marins sont composés d'un ensemble de nœuds terrestres appelés station d'atterrissage (partie terrestre) qui sont interconnectés par un système de ligne optique déployée sous la mer (partie submergée) sur des distances allant jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres. L'équipement terminal de ligne sous-marine (*Submarine Line Terminal Equipment*, SLTE) installé sur la terre comprend des émetteurs-récepteurs optiques, des commutateurs sélectifs en longueur d'onde (*Wavelength selective switch*, WSS), des multiplexeurs (MUX) et des démultiplexeurs (DEMUX), ainsi que des équipements de monitoring, d'alimentation électrique et de système de gestion de réseau (NMS). La partie submergée est composée des éléments qui sont posés sous l'eau tels que des câbles, des répéteurs et des unités de branchement (*Branching Units*, BU). Le système de ligne est composé d'un câble principal de fibre optique monomode équipé d'amplificateurs optiques (ou répéteurs) et de BU pour interconnecter les stations d'atterrissage de câbles à travers des branches reliées au câble principal (Shapiro, 2013). La Figure 1.1 illustre un réseau sous-marin typique avec un tronc classique et une branche.

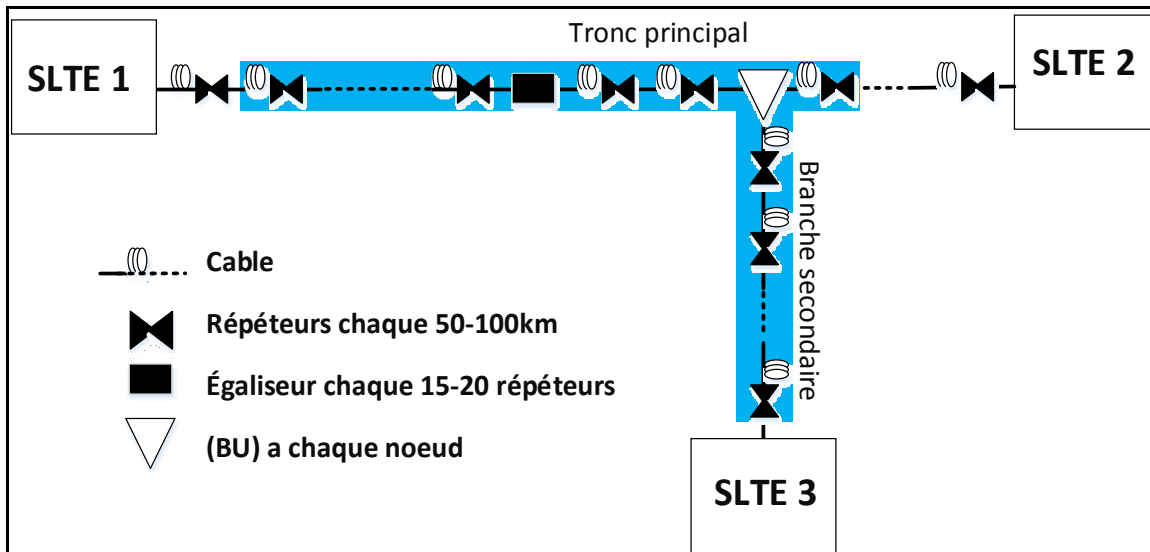


Figure 1.1 Les éléments d'un réseau de télécommunication sous-marin
Adaptée de Chesnoy (2002)

Dans cet exemple, le réseau comprend 3 stations d'atterrissage de câbles qui sont reliés entre eux par un système de ligne optique sous-marin. Les stations d'atterrissage des câbles SLTE sont équipées de transpondeurs, multiplexeurs, WSS, ainsi que d'amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA) qui compensent les pertes d'insertion du multiplexeur et WSS.

Les performances du système, la capacité et le coût des systèmes sous-marins sont principalement impactés par la portée (plus de 12 000 km pour les liaisons trans pacifiques (Pilipetskii, 2015)) et les besoins en capacité. Les systèmes doivent également présenter une grande fiabilité et une durée de vie opérationnelle de 25 ans (Shapiro, 2013).

Les réseaux sous-marins sont en général des réseaux optiques de longue distance qui peuvent être classés comme des réseaux point à point, tronc et branches, anneau, maillés, et *Festoon*, selon les exigences de connectivité et de trafic entre les différentes stations terrestres. Afin de satisfaire la demande mondiale de trafic, les réseaux sous-marins sont conçus pour supporter de très grandes quantités de trafic, par exemple 106×200 Gbit/s par pair de fibre (Cai et al., 2014). Les réseaux de longue distance comportent plusieurs répéteurs (amplificateurs

optiques), le rôle des répéteurs est l'amplification du signal après chaque segment dont la taille varie de 50 à 100 km (Pilipetskii, 2015). Les systèmes WDM sous-marins nécessitent l'utilisation d'égaliseurs de gain pour remettre le signal qui passe par la chaîne d'amplification en forme. Ces égaliseurs peuvent être soit placés une fois après plusieurs amplificateurs (bloc d'égalisation) ou pourraient être situés à chaque répéteur (Bergano, 2005).

Le passage par plusieurs répéteurs cause une amplification non uniforme de certaines parties du spectre. Dans les systèmes de télécommunication, au sens large, l'égalisation est toute technique de traitement de signal numérique qui minimise la dispersion et les effets non linéaires de la fibre et le dispositif capable de le faire est appelé un égaliseur (Tipsuwannakul et al., 2012) (Pradhan et al., 2015). L'égaliseur est un dispositif qui effectue l'opération inverse d'un canal déformé. Théoriquement, un égaliseur doit avoir une caractéristique de fréquence qui est l'inverse de celle du canal de transmission (Tipsuwannakul et al., 2012).

Plusieurs compromis doivent être pris en considération pour la conception et la mise en œuvre des systèmes sous-marins. Contrairement aux réseaux terrestres, les systèmes de ligne et les terminaux sous-marins sont conçus et optimisés en deux étapes distinctes. Dans la première étape, les parties submergées et terrestres sont conçues pour supporter une capacité initiale de trafic (Shapiro, 2013). Mais, avec l'augmentation du trafic et l'amélioration de la technologie des transpondeurs, les systèmes existants sont mis à niveau (ré optimisé) au-delà de leur capacité de conception initiale sans changer le système de câble.

Un équipement qui est spécifique au monde sous-marin et qu'on ne trouve pas dans les installations terrestres est l'unité de branchement (BU), la Figure 1.2 (a) montre la vue externe d'un BU, le cylindre blanc contient les composants électroniques et optiques de l'équipement.

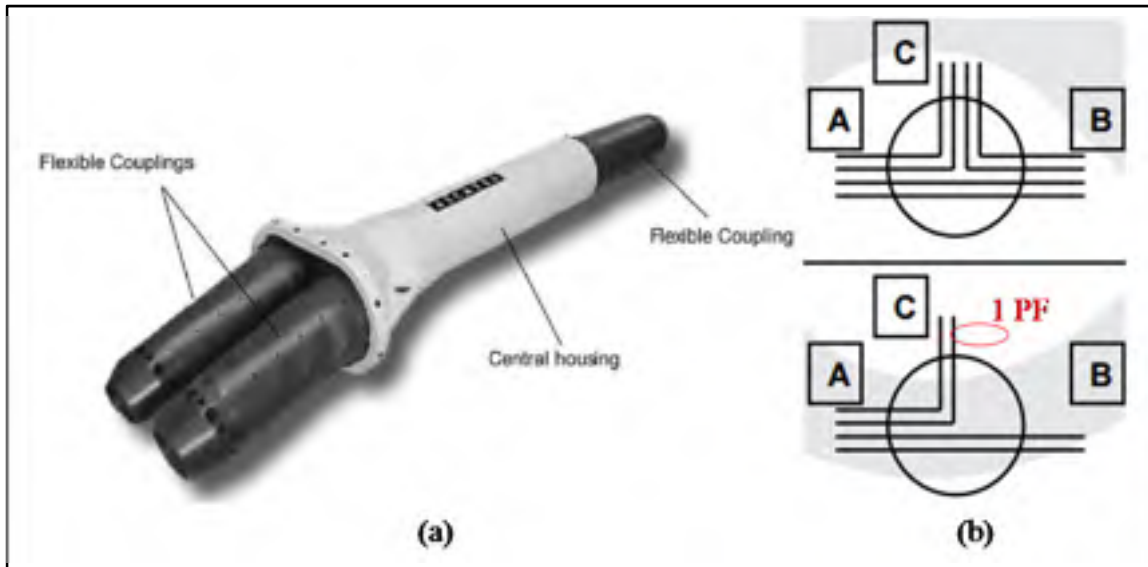


Figure 1.2 (a) Vue externe du BU; (b) Différente configuration du câble optique à l'intérieur d'un BU
Adaptée de Fujitsu (2007) et Chesnoy (2002)

Le rôle du BU est la connexion optique et électrique d'au moins trois câbles sous-marins. Un BU est conçu pour être totalement passif comme illustré à la Figure 1.2 (b), mais il se pourrait qu'il soit équipé d'un *Optical Add-Drop Multiplexer* (OADM) fixe (Fujitsu, 2007).

1.2 Évolution des réseaux optiques sous-marins : du WDM aux systèmes cohérents

Avant le déploiement des fibres avec des capacités de 100 Gbit/s par canal, les réseaux optiques sous-marins ne pouvaient transmettre que 5 Gbit/s sur une seule fibre. Dans le cas où le débit était insuffisant, et afin d'augmenter la capacité de transmission, il fallait utiliser des techniques comme le multiplexage spatial qui consiste tout simplement à transmettre l'information sur plusieurs câbles en parallèle. L'évolution de la capacité est passée par quatre générations de réseaux ; le passage entre les différentes générations s'est fait par l'introduction de nouvelles technologies. La Figure 1.3 résume l'évolution des réseaux sous-marins.

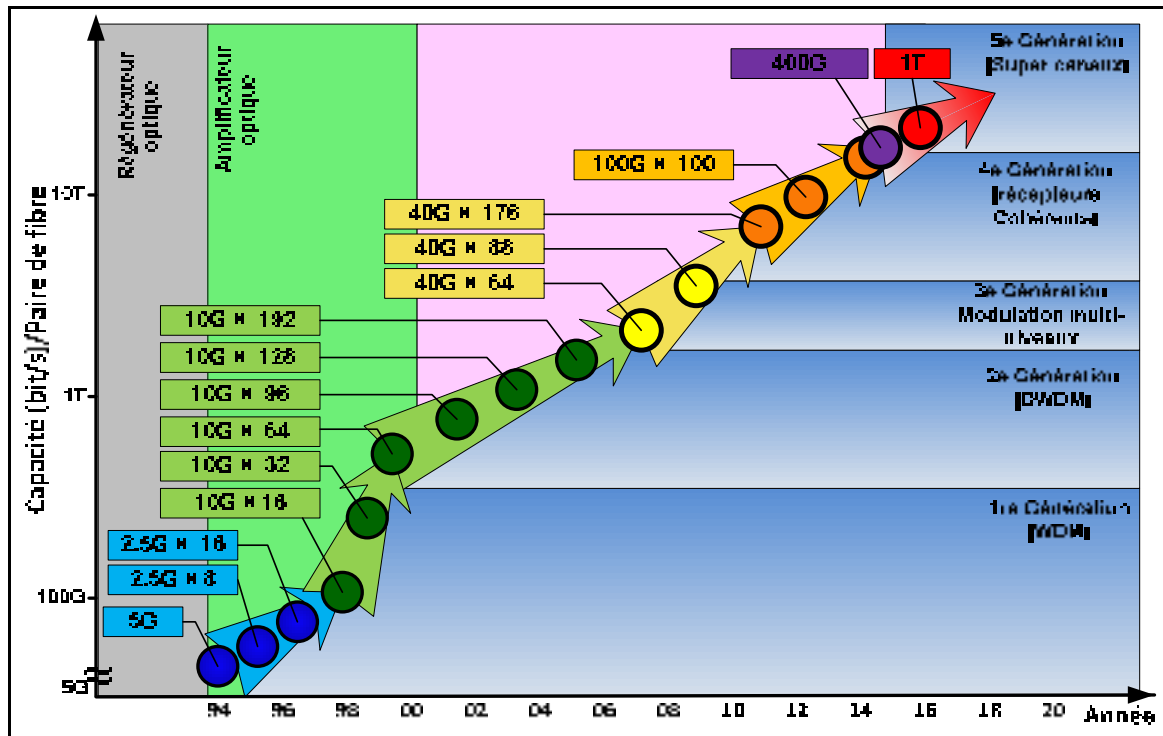


Figure 1.3 Évolution des réseaux sous-marins
Adaptée de Inada (2014)

On peut voir sur la Figure 1.3 l'évolution temporelle des débits de transmission sur fibre optique dans le monde sous-marin depuis le déploiement de 5 Gbit/s par fibre en 1994, la durée de chaque génération est délimitée par un rectangle horizontal, les différentes couleurs de flèches marquent l'évolution du débit d'un seul canal (... 10 Gbit/s → 40 Gbit/s → 100 Gbit/s → ...). Dans cette partie, nous allons introduire brièvement les technologies qui ont permis le passage entre les différentes générations.

1.2.1 Multiplexage de longueur d'onde

Le multiplexage en longueurs d'onde (*Wavelength Division Multiplexing*, WDM) a été introduit depuis les premières générations. Ce dernier consiste à séparer la bande en plusieurs canaux, chaque canal correspond à une longueur d'onde (λ_n). λ_n est défini par deux paramètres, à savoir sa position dans la grille de fréquence et sa largeur spectrale. La position et la largeur sont données en nanomètres (nm) ou en gigahertz (GHz). L'espacement entre les canaux est défini par

un organisme mondial (International Telecommunication Union ITU-T). Ci-dessous, la figure illustrant une liaison sous-marine basée sur le système WDM.

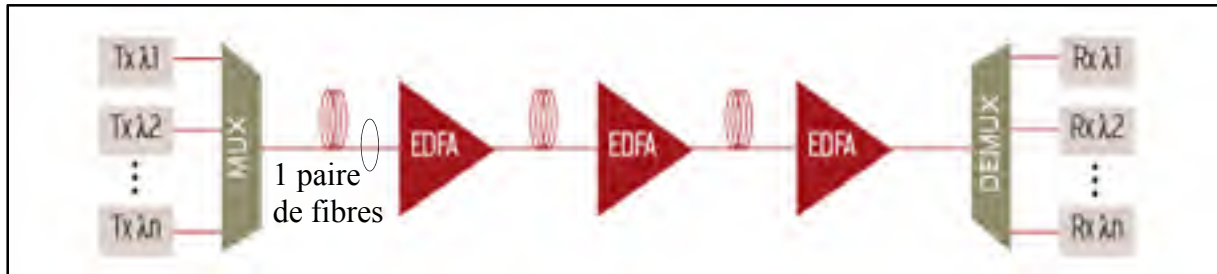


Figure 1.4 Liaison sous-marine WDM amplifiée
Tirée de SUDBØ (2006)

À la Figure 1.4, on distingue plusieurs canaux qui sont regroupés par un multiplexeur qui combine les signaux dans une seule fibre. Le signal combiné doit passer par plusieurs amplificateurs à fibre espacés de 40-100 km. Les amplificateurs à fibre sont des amplificateurs optiques utilisant une fibre dopée qui porte le signal de communication, le signal est pompé optiquement par un laser ayant une sortie continue de haute puissance à une fréquence optique légèrement supérieure à celle du signal de communication. Un amplificateur à fibre est capable d'amplifier un ensemble de longueurs d'onde multiplexées comme un seul signal optique à large bande. Le dopant le plus couramment utilisé dans les amplificateurs à fibre est l'erbium, et un tel amplificateur à fibre est connu comme un amplificateur à fibre dopée à l'erbium (*Erbium Doped Fiber Amplifier*, EDFA) (SUDBØ, 2006). Les EDFA permettent au signal d'arriver avec une puissance suffisante pour le décoder à la réception. Au niveau de cette dernière, les signaux sont séparés à nouveau à travers un démultiplexeur.

Les EDFA ont été intégrés dans les réseaux optiques sous-marins dès la première génération. Ces derniers ont permis d'augmenter la longueur entre les liaisons, en effet la portée des systèmes sous-marins dépasse les 10 000 km. Ces amplificateurs opèrent dans la bande C (1530-1565 nm) telle qu'illustrée à la Figure 1.5.

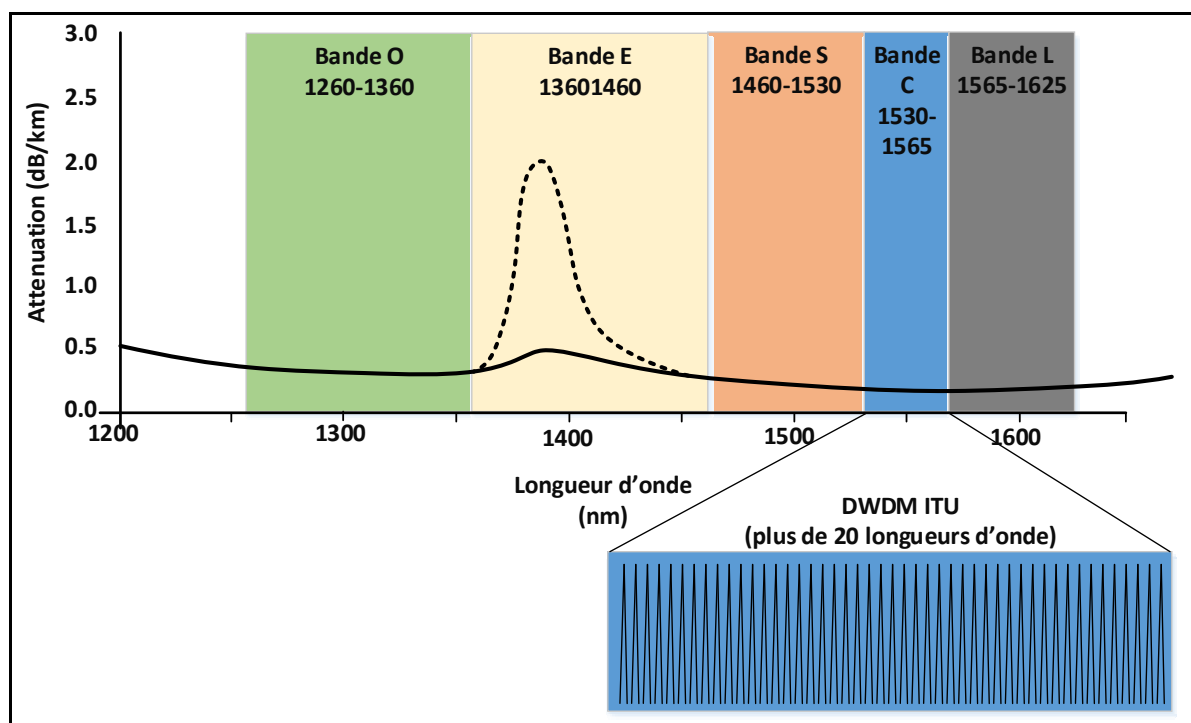


Figure 1.5 Spectre d'une fibre
Adaptée de A2net (2015)

À la Figure 1.5, on remarque que la bande C occupe une petite partie du spectre exploitable par la fibre optique. On tient à signaler que les travaux de recherche actuels visent à introduire des amplificateurs Raman dont l'avantage est la possibilité d'opérer dans les autres bandes afin d'augmenter encore la capacité de transmission des réseaux optiques. Une liaison, de 2 500 km, a déjà été déployée et testée dans des conditions réelles avec des amplificateurs Raman (Xtera, 2013).

1.2.2 Format de modulation

Avec la demande mondiale qui ne cesse de croître, les réseaux optiques devaient répondre à ces besoins en introduisant de nouveaux formats de modulation plus résistants au bruit et permettant de transporter plus d'informations. Avec les nouveaux formats de modulation, la capacité du canal est passée à 40 Gbit/s, soit un débit quatre fois plus important comparé aux générations précédentes qui généralement utilisent des formats de modulation *On-Off Keying*

(OOK). La modulation OOK a été remplacée dans un premier temps par une modulation de phase plus évoluée (*Binary Phase Shift Keying*, BPSK). Cette dernière est une modulation à deux symboles tout comme le OOK, mais elle est plus résistante aux bruits, ce qui permet une distance plus grande par rapport aux autres formats de modulation. La représentation des symboles sur une constellation permet de voir clairement que la distance entre deux symboles BPSK est nettement plus grande comparée à ceux de la modulation OOK (voir Figure 1.6).

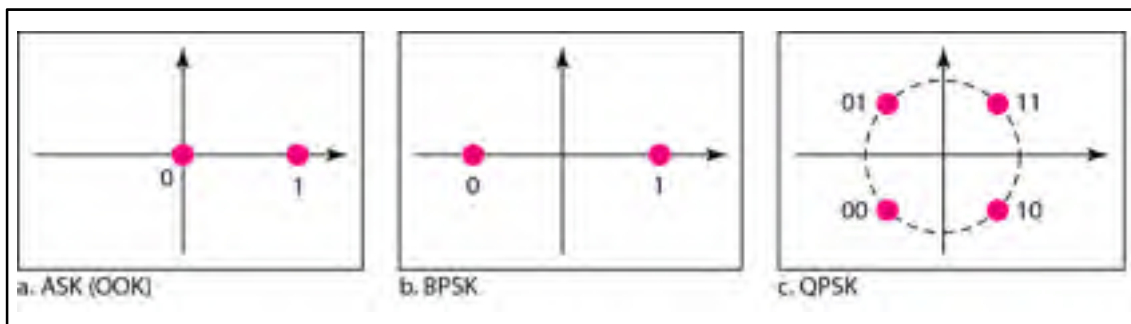


Figure 1.6 Constellation des formats de modulation (a) OOK; (b) BPSK; (c) QPSK

Bien qu'il existe d'autres formats de modulations de phase, le BPSK reste le format le plus simple. En général, la désignation des formats de modulation de phase est de la forme XPSK où X représente le nombre de symboles, on cite par exemple le QPSK pour 4 symboles et le 8PSK pour 8 symboles. Il en est de même pour la désignation des formats de modulation qui combinent la phase et l'amplitude (*Quadrature Amplitude Modulation*, QAM).

Par la suite, il y a eu l'introduction d'une technique de multiplexage qui permet d'envoyer l'information sur les deux polarisations du signal en même temps (*Dual Polarisation*, DP) ou on le trouve aussi sous l'appellation multiplexage de polarisation (*Polarisation Division Multiplexing*, PDM), la combinaison du DP avec la modulation BPSK (*Dual Polarisation BPSK*) permet de doubler la capacité d'un canal. Pour que le signal atteigne encore des capacités plus grandes sur une longue distance, une autre technique est utilisée; elle consiste à combiner deux canaux (*Dual Carrier*, DC) modulés avec le format DP-QPSK ou DP-BPSK (Salsi et al., 2010) (Dayou et al., 2011). Il est à noter que le nouveau format de modulation

DC-DP-QPSK permet d'atteindre une plus longue distance au détriment de la capacité globale, car un canal occupe maintenant l'espace de deux canaux dans le spectre.

On définit l'efficacité spectrale comme le débit par canal divisé par la largeur spectrale du canal. Par exemple, un signal DP-BPSK à 100 Gbit/s dans une grille de 100 GHz a une efficacité spectrale de 1bit/s/Hz. En passant à une modulation plus élevée, comme DP-QPSK, l'efficacité spectrale sera plus élevée, mais la puissance du signal sera plus faible pour chaque bit (Infinera, 2012). On peut déduire de ces valeurs que plus le nombre de symboles est élevé, plus le canal gagne en capacité, en revanche, il parcourt moins de distance. La distance maximale que peut parcourir un signal pour le même format de modulation varie d'un constructeur à un autre, cette limite dépend fortement du design du transpondeur. La Figure 1.7 montre un graphe typique de la portée des systèmes de transmission selon le format de modulation. On peut voir que le BPSK peut atteindre jusqu'à 12 000 km. Alors que le QPSK et le 16 QAM ne dépassent pas 8 000 km et 1 000 km respectivement selon (Collings, 2013) et (Infinera, 2012).

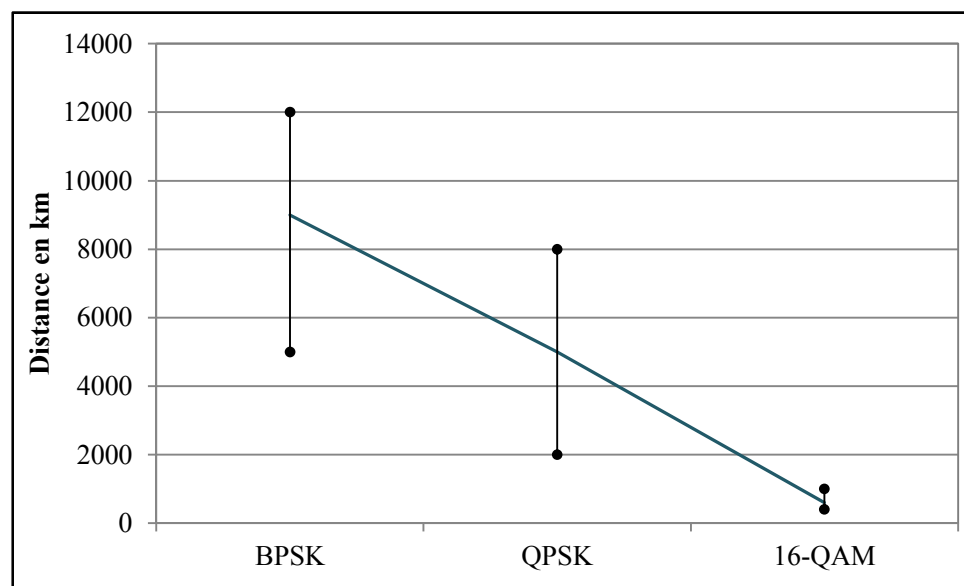


Figure 1.7 Graphe montrant la distance maximale possible sans régénération selon le format de modulation
Adaptée de Collings (2013) et Infinera (2012)

1.2.3 Systèmes cohérents

Les nouvelles générations ont permis l'introduction des transpondeurs cohérents qui a donné plus de flexibilité aux réseaux. Le récepteur d'un transpondeur cohérent permet de récupérer un signal avec n'importe quelle longueur d'onde. Les anciens transpondeurs ne pouvaient recevoir que la longueur d'onde correspondante au filtre. À la Figure 1.8, on peut voir un exemple d'un récepteur cohérent.

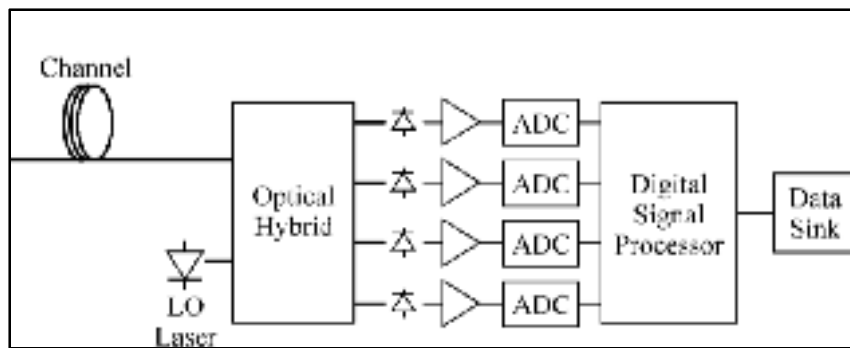


Figure 1.8 Récepteur cohérent
Tirée de Leven, Kaneda et Corteselli (2010)

Dans un récepteur cohérent numérique typique, le signal optique entrant est mélangé avec un oscillateur local à travers un composant hybride optique. Ce composant sépare les composantes optiques du signal en phase et en quadrature reçu de chacune des deux polarisations. Par la suite, les quatre signaux sont détectés en utilisant quatre photodétecteurs. Les signaux électriques analogiques détectés sont numérisés par quatre convertisseurs analogiques numériques (CAN) puis transmis à une unité de traitement de signal numérique (DSP), qui est le cœur du récepteur numérique cohérent.

La partie DSP égalise le signal numérique en deux étapes. La première étape d'égalisation est utilisée pour la compensation numérique de la dispersion chromatique. La deuxième étape d'égalisation permet le recouvrement de la polarisation et le démultiplexage, ainsi que la compensation de la dispersion des modes de polarisation (PMD) et aussi la compensation de la dispersion chromatique résiduelle. D'autres effets de distorsion linéaires tels que les effets

de filtrage optique peuvent également être compensés par cette égalisation adaptative. Enfin, le recouvrement de la phase et de l'horloge peut aussi être traité par le module DSP (Leven, Kaneda et Corteselli, 2010) (Infinera, 2012).

1.3 Contraintes des réseaux sous-marins

Les systèmes sous-marins de fibre optique doivent être conçus pour supporter le déploiement et le fonctionnement dans l'environnement marin qui impose des limites strictes sur les composants qui peuvent être déployés dans la partie submergée. Les OADM reconfigurables (ROADM) qui sont déployés dans les réseaux terrestres ne sont pas encore qualifiés pour les réseaux sous-marins. Ils peuvent être déployés uniquement dans la partie terrestre, mais pas au niveau des unités de branchement ; ce qui rend ces réseaux moins flexibles du point de vue reconfiguration et réallocation de longueurs d'onde. Les unités de branchements actuels comprennent des coupleurs passifs, ou des OADM fixes pour relier les branches au câble principal (Shapiro, 2013). Comme le trafic mondial augmente et devient plus dynamique, la nécessité de fournir plus d'agilité dans les réseaux sous-marins devient de plus en plus importante. Les BU reconfigurables basés sur des multiplexeurs/démultiplexeurs passifs, des bloqueurs de longueurs d'onde (*Wavelength Blocker*, WB) ou des WSS ont été proposés récemment (Ji, 2013) (Ji, Aida et Wang, 2015). Cependant, ces dispositifs nécessitent encore plusieurs tests de qualification avant d'être déployés sous la mer tels que la performance, la robustesse et la durée de vie.

1.4 Architecture sans filtre

Les réseaux optiques sans filtre ont été étudiés pour des applications terrestres dans (Archambault et al., 2010) et (Mantelet et al., 2013). L'architecture du réseau sans filtre est basée sur les nœuds passifs équipés de diviseurs et combineurs de puissance passifs et des transpondeurs cohérents. L'agilité dans les réseaux sans filtre, contrairement aux réseaux basés sur des ROADM conventionnels, est réalisée au niveau des terminaux par des transpondeurs cohérents. Les réseaux sans filtre offrent essentiellement un support de diffusion passive dans laquelle les diviseurs et combineurs optiques passifs sont utilisés pour

interconnecter les liens optiques et remplacent les multiplexeurs et démultiplexeurs. Cette architecture de réseau optique passif élimine le besoin d'éléments de commutation photonique, tels que les ROADMs ou les dispositifs d'interconnexion optiques (OXC), dans le système de ligne optique. La technologie cohérente est essentielle pour les terminaux et l'agilité du système, car elle effectue la sélection de la longueur d'onde souhaitée au niveau du site d'extraction de cette longueur d'onde. La technologie cohérente est un élément clé d'une solution sans filtre. D'après les études présentées dans (Archambault et al., 2010) et (Tremblay et al., 2013), l'architecture du réseau résultant réduit le coût initial du réseau au détriment d'une consommation plus élevée en longueur d'onde. La fonction passive de diffusion et de sélection des réseaux sans filtre peut également apporter d'autres avantages importants, comme une conception physique simplifiée, une bonne résilience ainsi que la réduction du temps d'établissement des connexions optiques.

1.4.1 Exemple d'un réseau sans filtre terrestre

Un réseau sans filtre est basé sur la construction d'un ensemble de liens de fibre optique qui relient tous les nœuds entre eux en utilisant des diviseurs et des combineurs optiques passifs. Un ensemble de fibres interconnectées forme un arbre de fibre. Les connexions optiques sont établies à l'intérieur d'un arbre de fibres unique en fonction du trafic entre les nœuds du réseau.

La figure ci-dessous montre un exemple d'un réseau Allemand (Andreas Betker, 2003) avec 7 nœuds (en rouge) et 11 paires de liens optiques (noires) illustré à la Figure 1.9.

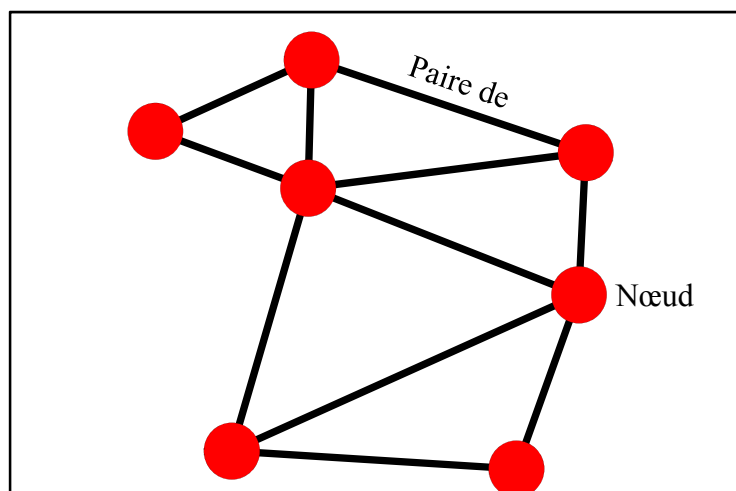


Figure 1.9 Topologie du réseau Allemand à 7 nœuds
La solution comme illustrée sur MATLAB® est à la Figure 1.10.

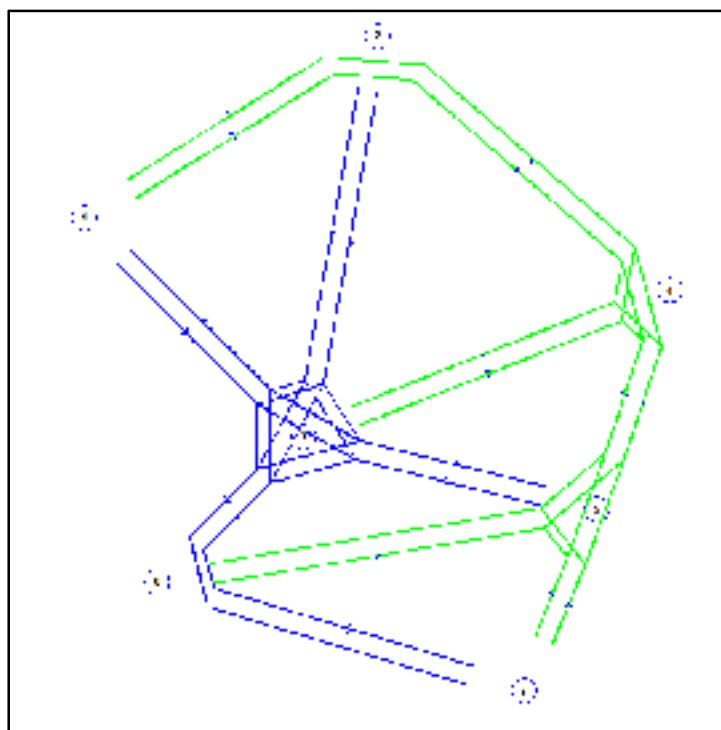


Figure 1.10 Solution MATLAB® du réseau Allemand à 7 Noeuds

À la Figure 1.10, chaque arbre de fibres est représenté par un motif de lignes différent. Un total de 2 arbres de fibre et 10 diviseurs optiques passifs ont été utilisés pour interconnecter

tous les nœuds du réseau. Dans cet exemple, une connexion entre les nœuds 7 et 2 peut être réglée à l'aide de l'arbre de lumière représenté par les lignes bleues, et un certain nombre de longueurs d'onde peut être attribué en fonction de la demande de trafic entre ces deux nœuds.

La connectivité complète d'une solution sans filtre est illustrée à la Figure 1.11. Les différentes couleurs permettent de distinguer les arbres de fibres entre eux. Cette illustration est certes détaillée, mais elle est aussi très complexe à réaliser graphiquement à l'aide d'un logiciel de programmation. La solution obtenue avec MATLAB® est plus simple et permet de voir les différents arbres de fibres ainsi que les différents nœuds.

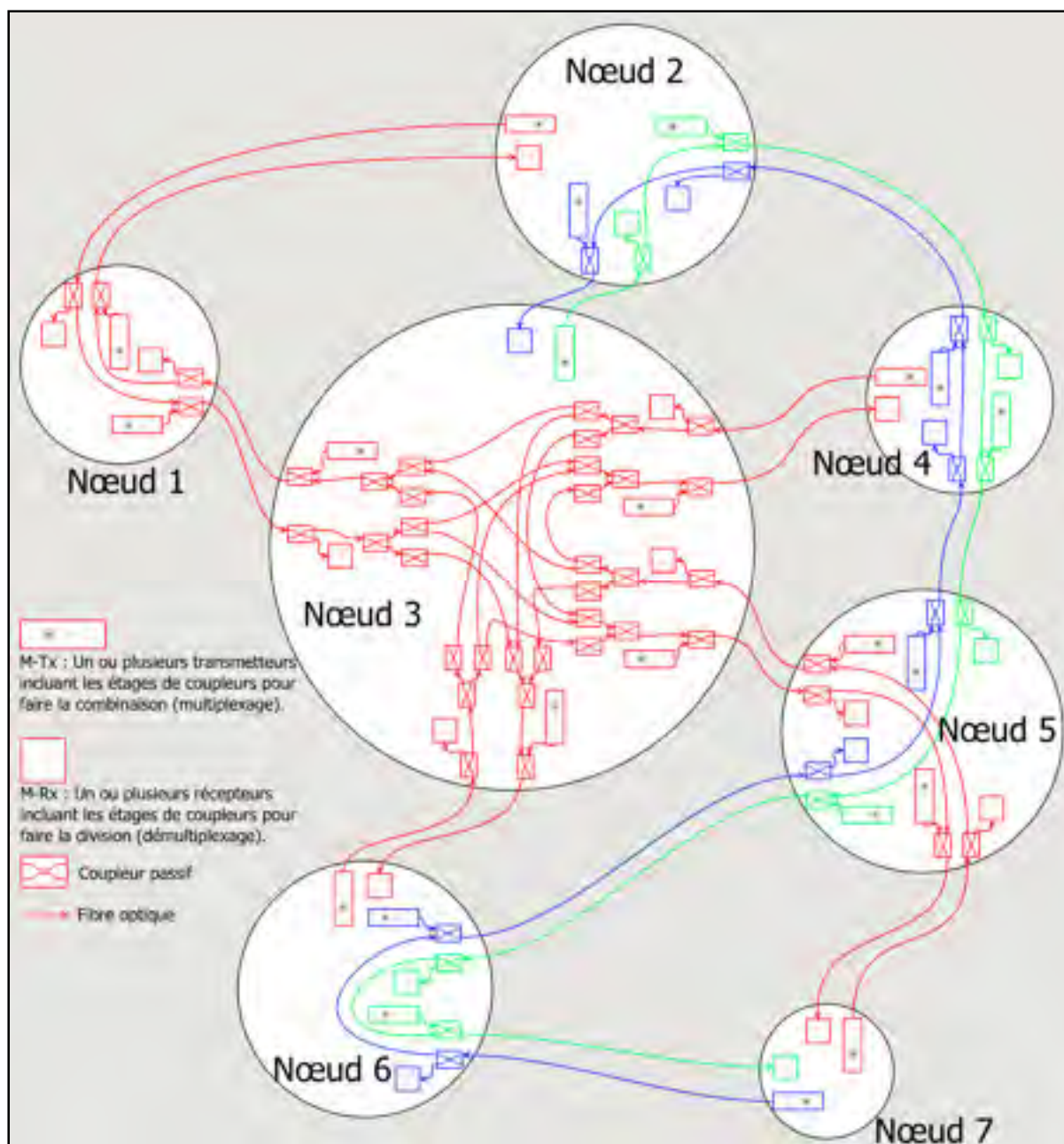


Figure 1.11 Solution sans filtre à trois arbres de fibres optiques du réseau allemand à 7 nœuds démontrant la pleine connectivité faite à partir de coupleurs passifs et de fibres optiques.

Chacune des couleurs représente un arbre de fibres optiques distinct

Tirée de Cassidy (2012)

1.4.2 Avantage des réseaux sans filtre

D'après les études précédentes, l'utilisation des réseaux sans filtre présente plusieurs avantages dus essentiellement à l'élimination de la plupart des équipements actifs au niveau des nœuds tels que les WSS et les multiplexeurs. Ces derniers coûtent beaucoup plus cher que les diviseurs passifs, et occupent plus de place dans les installations, ce qui fait que le coût global de la solution est énormément réduit en matière d'argent et de consommation en énergie.

De plus, chaque passage du signal à travers un équipement donné entraîne une perte de puissance et cause plus de latence. Or dans un réseau sans filtre, l'établissement d'un lien entre deux points passe par moins d'équipements, dès lors, les pertes optiques sont réduites et la latence du système est meilleure.

Comme les diviseurs passifs ne contiennent pas de filtres, le réseau ne dépend plus de la grille ITU-T. ce qui lui permet d'opérer avec plus de flexibilité en choisissant le schéma optimal pour l'assignation du spectre, surtout que la prochaine génération de réseaux optiques sous-marins (à 400 Gbit/s et 1 Tbit/s) sera basée sur des canaux de largeur spectrale différente et non sur les canaux fixes de la grille ITU-T. Par contre, dans le cas des réseaux conventionnels, le passage vers des réseaux sans grille nécessite le changement de tous les équipements qui contiennent des filtres.

L'un des points forts des réseaux sans filtre est l'agilité, c.-à-d. la capacité du réseau à se reconfigurer rapidement (en l'absence de ROADM) en fonction des variations de trafic. En effet, les réseaux sans filtre permettent de fournir l'agilité au réseau (i.e. la capacité de réassigner le spectre ou les transpondeurs) via les transpondeurs cohérents uniquement sans reconfiguration de la ligne. Cette particularité peut être exploitée lorsque le trafic atteint son maximum dans les différents nœuds du réseau à des moments différents de la journée (dans les réseaux qui traversent plusieurs fuseaux horaires, par exemple), donnant la possibilité d'effectuer une allocation dynamique des transpondeurs et du spectre. Sur ce dernier point, une explication est fournie au chapitre 4.

Un autre avantage compétitif des réseaux sans filtre concerne le temps de réparation en cas de panne sur les réseaux sous-marins (Mean Time Between Failure - MTBF). Le fait d'avoir moins d'équipements complexes, alors le risque de tomber en panne est clairement réduit, d'où les gains en matière de temps et des coûts de réparation.

1.5 Le choix des réseaux sans filtre dans le monde sous-marin

Les réseaux agiles, évolutifs et dynamiques qui s'adaptent aux besoins des utilisateurs sont nécessaires pour les exigences actuelles du marché. Afin d'introduire l'agilité dans les réseaux optiques, les ROADM sont requis pour une flexibilité totale en matière de connectivité de longueur d'onde (Gringeri et al., 2010). Certains types de ROADM peuvent être programmés pour commuter les connexions fonctionnant avec toutes les longueurs d'onde avec n'importe quelles exigences spectrales et à toute direction sortante. Par contre, ces ROADM nécessitent un grand nombre de composants optiques qui se traduit par un coût très élevé et une plus grande consommation d'énergie. De plus, les ROADM qui sont déployés dans des applications terrestres ne sont pas qualifiés pour être déployés sur les BU des réseaux sous-marins. Dans les réseaux sous-marins actuels, les OADM fixes connectent les branches avec le tronc principal sous l'océan où les longueurs d'onde sont arrangées d'une manière fixe et prédéterminée (Figure 1.12).

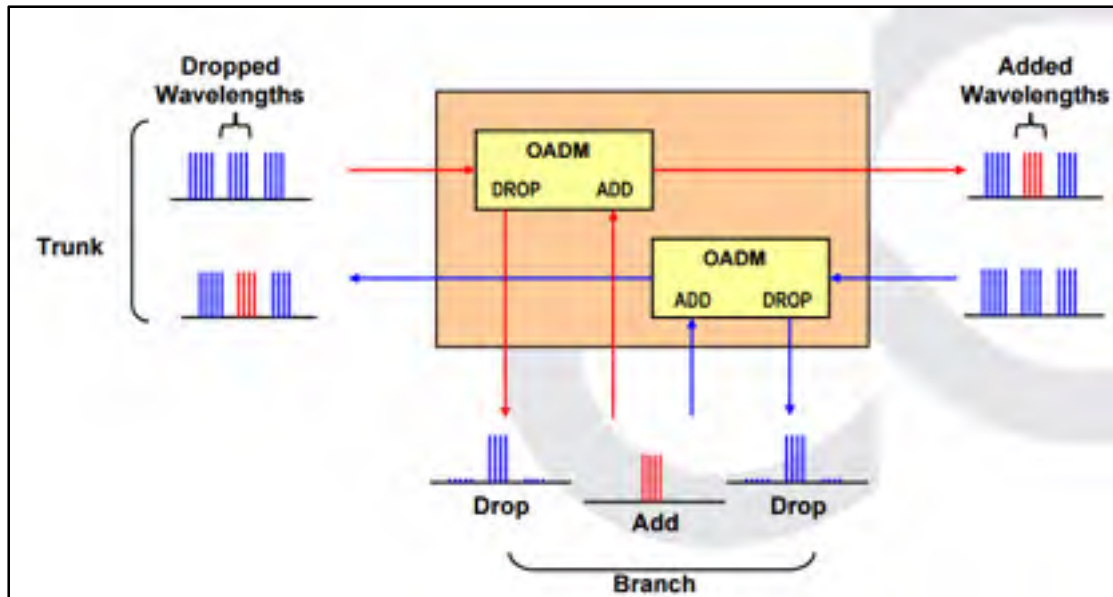


Figure 1.12 Nombre fixe de canaux insérés et extraits dans une unité de branchement avec OADM
Tirée de Fujitsu (2007)

La Figure 1.12 montre un BU avec OADM entre trois stations terrestres. Une seule longueur d'onde est insérée (en rouge) depuis la station terrestre située sur une branche du réseau et une seule aussi est extraite. La configuration de la Figure 1.12 limite la flexibilité du réseau sous-marin, car la longueur d'onde extraite ne peut être changée.

Les BU reconfigurables (RBU) basés sur les multiplexeurs/démultiplexeurs passifs, et des bloqueurs de longueur d'onde (WB) ou un commutateur sélectif de longueur d'onde (WSS) ont été proposés récemment (Ji, Aono et Wang, 2010). Les RBU nécessitent un grand nombre de commutateurs ; et l'introduction de WSS dans un BU augmente la complexité de commande. De plus, les RBU contiennent des composants de filtrage supplémentaires, ils ont besoin de quelques amplificateurs supplémentaires pour compenser les pertes d'insertion, et il pourrait être nécessaire de surveiller et d'égaliser la puissance provenant de chaque branche.

Les ROADM sous-marins utilisant des unités de branchements passifs telles que des *interleavers* optiques et des *deinterleavers* sont également proposées (Ji, Aono et Wang,

2010). Ces ROADM ont une capacité de reconfiguration limitée à cause que les canaux pairs et impairs sont séparés et envoyés dans deux ports de sortie différents. Ainsi, dans une telle situation, une reconfiguration des longueurs d'onde peut être nécessaire à partir des nœuds se trouvant sur terre afin de s'adapter à la variation de trafic et d'assurer l'optimisation des ressources.

L'architecture des réseaux optiques sans filtre basé sur des nœuds passifs et des transpondeurs cohérents au niveau des nœuds terrestres permet de surmonter ces problèmes avec finesse. Les réseaux optiques sans filtre sont capables de fournir l'agilité par des transpondeurs cohérents équipés de DSP. Dans les réseaux sans filtre, la reconfiguration des chemins optiques peut être exécutée sans aucune reconfiguration physique des éléments du réseau. En construisant des réseaux avec des nœuds terrestres agiles équipés de diviseurs et combineurs et des transpondeurs cohérents, la flexibilité est obtenue à un coût réduit sans nécessiter des composants actifs dans la ligne optique. Puisqu'il n'y a pas de dispositif actif à l'intérieur du BU, alors il ne consomme pas d'énergie et il n'est pas exposé aux problèmes de panne, ce qui augmente la fiabilité.

C'est pour toutes ces raisons qu'on est motivé à travailler sur la technologie des réseaux sans filtre, et on présente notre solution dans les chapitres suivants

CHAPITRE 2

PLATEFORME DE CONCEPTION ET DE SIMULATION

2.1 Introduction

La simulation des réseaux de fibres optiques peut se faire sur plusieurs plateformes (logiciels). Chaque plateforme offre une multitude d'outils, qui vont de la simulation du comportement du réseau au niveau de la couche physique, jusqu'à la simulation des couches supérieures du modèle *open systems Interconnection* (OSI).

Les logiciels disponibles sur le marché comme *Ciena Optical Planner*TM permettent d'effectuer le routage des connexions physiques et de calculer la consommation en longueur d'onde d'un réseau conventionnel. Cependant, pour simuler le routage et la consommation en longueur d'onde d'un réseau sans filtre, d'autres plateformes sur d'autres logiciels de développement tels que *Microsoft Visual Studio*® et MATLAB® ont été développées.

Dans le cadre de ce projet, une nouvelle plateforme a été développée sur *Microsoft Visual Studio*® afin d'automatiser certaines tâches qui se réalisaient manuellement. La plateforme initiale développée sous MATLAB® pour les réseaux sans filtre terrestres a été modifiée afin que les contraintes relatives aux réseaux sous-marins soient considérées. Certains programmes ont été rajoutés pour la simulation du concept d'agilité dans les réseaux sans filtre, ainsi qu'une interface pour convertir les matrices de trafic qu'on trouve dans MATLAB® vers un format reconnaissable par *Ciena Optical Planner*TM.

Dans ce qui suit est présentée une brève description des outils existants en mettant l'accent sur les parties qui ont été modifiées dans le cadre du présent projet, ainsi qu'une description plus détaillée des outils adaptés.

2.2 Ensemble des outils de conception des réseaux sans filtre sous-marins

La Figure 2.1 illustre les différents outils de conception des réseaux sans filtre sous-marins et les différents liens entre eux.

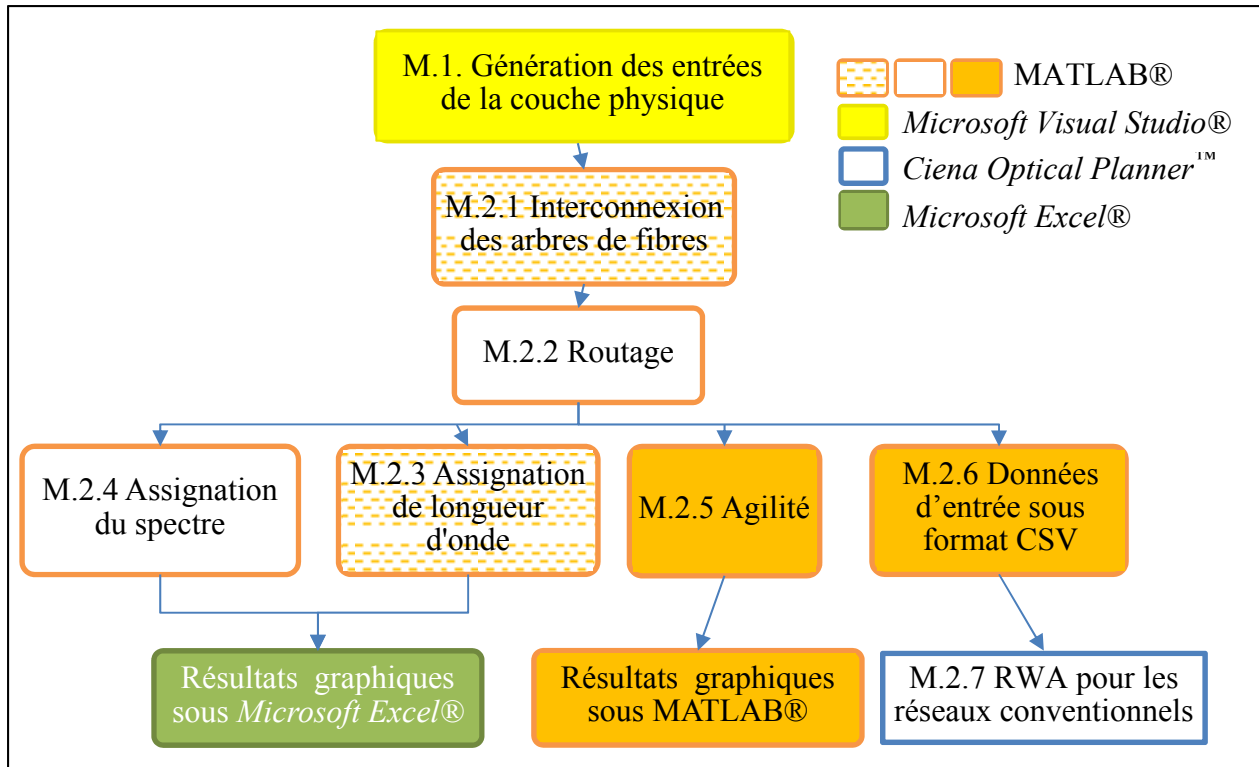


Figure 2.1 Ensemble des outils de conception des réseaux sans filtre sous-marins

À la Figure 2.1 les blocs dotés de contours de couleur orange correspondent aux programmes développés sous MATLAB®. Le bloc doté de contour de couleur jaune correspond au programme développé sous *Microsoft Visual Studio*®. Les blocs sur fond blanc représentent les outils existants, ceux avec un motif de traits horizontaux ont été adaptés à partir des outils existants, en fin les blocs sur fond de couleur pleine ont été ajoutés durant ce projet.

2.3 Génération des entrées de la couche physique

La première étape de conception d'un réseau sans filtre consiste à concevoir une architecture sans filtre à base d'arbres de fibre optique à partir des données topologiques (nombre de

nœuds, distances entre les nœuds) d'un réseau. Un outil appelé « *génération des entrées de la couche physique* » a été conçu pour mettre ces données sous un format acceptable pour le module d'interconnexion des arbres de fibres (Figure 2.1, étape M.2.1).

2.3.1 Outil Microsoft Visual Studio®

Microsoft Visual Studio® est un outil de développement de Microsoft qui regroupe plusieurs langages de programmation et sert à générer des programmes pour des périphériques Windows et des appareils mobiles, ainsi que des applications web et des services web. *Microsoft Visual Studio®* offre la possibilité de coder les programmes avec différents langages de programmation, dans notre cas nous avons utilisé le langage C#.

2.3.2 Présentation de l'outil développé sous *Microsoft Visual Studio*

Dans le présent projet, le programme qui a été développé avec cet outil consiste à générer des lignes de code MATLAB® à partir d'une topologie créée sur l'interface graphique. Les lignes de code servent à définir la topologie qu'on veut simuler sur les outils déjà existants. Les données extraites de cet outil sont insérées directement dans le programme d'interconnexion des arbres de fibres. La Figure 2.2 illustre une topologie dessinée avec cette application.

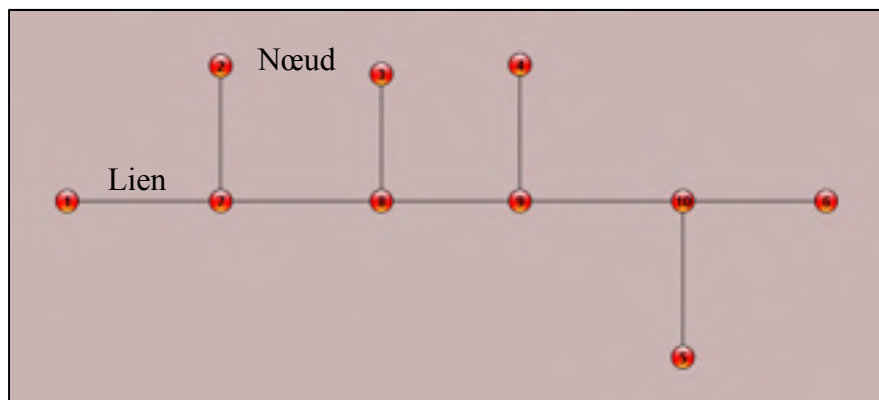


Figure 2.2 Topologie physique dessinée à l'aide du programme de génération des entrées de la couche physique

Les points en rouge de la Figure 2.2 représentent les nœuds d'un réseau et les lignes noires correspondent à des liens bidirectionnels entre deux nœuds. L'application permet de générer les données de la Figure 2.3, c'est-à-dire des matrices contenant les données topologiques.

NodesDefinition

Coordinate :

Nodes	X	Y
Node 1	425	1455
Node 2	613	1600
Node 3	755	1585
Node 4	898	1609
Node 5	1019	1308
Node 6	1181	1433
Node 7	608	1467
Node 8	757	1472
Node 9	915	1466
Node 10	1020	1463

Distances Array:

Nodes	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7	Node 8	Node 9	Node 10
Node 1	0									
Node 2	237	0								
Node 3	354	142	0							
Node 4	497	285	145	0						
Node 5	611	500	382	324	0					
Node 6	756	592	452	333	204	0				
Node 7	183	133	188	322	440	574	0			
Node 8	332	192	113	196	309	425	149	0		
Node 9	490	330	199	144	189	268	307	158	0	
Node 10										0

Contact Array:

Nodes	1	2	3	4	5	6
Node 1	1	2	0	0	0	0
Node 2	3	4	0	0	0	0
Node 3	5	6	0	0	0	0
Node 4	7	8	0	0	0	0
Node 5	9	10	0	0	0	0
Node 6	11	12	0	0	0	0
Node 7	13	14	15	16	17	18
Node 8	19	20	21	22	23	24
Node 9	25	26	27	28	29	30
Node 10	31	32	33	34	35	36

Links Array:

Cont src	Cont dst	Node src	Node dst
1	13	1	7
3	15	2	7
5	19	3	8
7	25	4	9
9	31	5	10
11	33	6	10
17	21	7	8
23	27	8	9
29	35	9	10
14	2	7	1

Generate file

Figure 2.3 Données topologiques obtenues à partir du programme *Microsoft Visual Studio*®

L'application calcule les coordonnées et les distances en nombre de pixels qu'il est possible de convertir en coordonnées de position et distances physiques. Les matrices de contacts et de liens sont calculées à partir du dessin de la Figure 2.2. Un contact est le point de liaison entre un lien et un nœud. Le nombre de contacts est égal à deux fois le nombre de liens. Une matrice de contacts ($m \times n$) associe à chaque nœud m les numéros de contacts qui la relient aux différents liens. La matrice de lien contient les contacts source (1^{re} colonne) et destination (2^e colonne) qui correspondent aux nœuds source (3^e colonne) et destination (4^e colonne) de chaque lien.

Le résultat obtenu est un fichier texte qui contient toutes les données topologiques d'un réseau utilisées comme paramètres d'entrées du module MATLAB® d'interconnexion des arbres de fibres (Figure 2.1, étape M.2.1)

2.4 Conception de réseau sans filtre

La conception comme telle comprend deux étapes principales, soit l'interconnexion de fibres (Figure 2.1, étape M.2.1) et le routage (Figure 2.1, étape M.2.2) et l'assignation de longueur d'onde (Figure 2.1, étape M.2.3) (*Routing and Wavelength Assignment*, RWA) selon la demande de trafic. La première étape, qui est le routage, est essentielle, car elle définit la connectivité physique du réseau, qui détermine à son tour les solutions possibles du problème RWA. Comme décrit dans (Tremblay et al., 2007), un réseau optique sans filtre peut être représenté par un graphe, et le problème de conception de la topologie virtuelle sans filtre peut être défini avec les paramètres, les contraintes, les variables, et l'objectif d'optimisation.

2.4.1 Outils de conception MATLAB®

MATLAB® est un logiciel de programmation et de conception très évolué destiné aux ingénieurs et aux chercheurs de différents domaines pour leur faciliter l'élaboration des programmes. En effet, MATLAB® contient une multitude de bibliothèques et d'algorithmes développés par des professionnels, en cas de besoin, les algorithmes sont aisément introduits dans le programme sous forme de fonctions uniques. Ces fonctions permettent un gain énorme en termes de temps. Dans MATLAB®, il existe aussi beaucoup de fonctions qui facilitent la manipulation des matrices, cet avantage est l'une des raisons qui ont fait que MATLAB® soit utilisé pour concevoir et simuler un réseau sans filtre, car la plupart des données utilisées sont justement sous forme de matrices.

Les algorithmes d'interconnexion de fibre et de RWA ont été développés pour résoudre le problème de la conception et de la planification du réseau sans filtre. Les algorithmes ont été intégrés dans une plateforme de conception et de simulation des réseaux sans filtre (*Filterless Network Design And Simulation*, FNDS) développée dans un environnement

MATLAB®. Pour une topologie physique d'un réseau et une matrice du trafic, cet outil permet de générer une matrice d'interconnexion des différentes fibres ainsi que d'effectuer le RWA pour toutes les demandes de connexion. Diverses solutions peuvent être obtenues, en fonction des paramètres d'optimisation choisis (nombre de longueurs d'onde, le nombre d'arbres de fibre, le nombre de diviseurs optiques passifs, etc.). Les principales caractéristiques du réseau peuvent encore être extraites à partir des résultats de simulation et utilisées pour l'analyse de la performance.

Un autre outil d'assignation de spectre (Figure 2.1, étape M.2.4) (*Routing and Spectrum Assignment*, RSA) est disponible (Zhenyu et al., 2015). Le programme est basé sur les algorithmes génétiques et il a besoin des résultats du programme de routage comme entrées. Enfin, un outil qui génère automatiquement un rapport détaillé sur les coûts de la solution sans filtre et de la solution conventionnelle ainsi qu'une comparaison entre les deux a été développé.

2.4.2 Adaptation des outils de conception MATLAB®

À la Figure 2.1, il a été remarqué que la plateforme de conception est composée de plusieurs programmes. Dans ce qui suit, les différents algorithmes de conception ont été décrits brièvement et les parties qui ont été adaptées pour traiter le cas des réseaux sous-marins ont été expliquées plus en détail.

Des outils de conception basés sur des algorithmes génétiques et tabou ont déjà été développés pour trouver des solutions de réseau sans filtre pour les applications terrestres (Archambault et al., 2010). Le problème est résolu en deux étapes avec l'utilisation comme entrées d'une topologie physique et d'une matrice de trafic. La première étape consiste à résoudre le problème d'interconnexion des liens avec l'algorithme génétique. L'objectif est d'établir un ensemble d'arbres de fibre qui satisfait toutes les demandes de connexion et garantit que tous les nœuds peuvent être connectés physiquement à l'aide de diviseurs passifs au niveau des nœuds intermédiaires. L'agilité du réseau, ainsi que la portée du système transocéanique, sont rendues possibles grâce aux transpondeurs cohérents équipés avec un

module DSP qui permet aussi de compenser la dispersion chromatique et la dispersion des modes de polarisation, en plus du module de correction d'erreurs (*Forward error correction*, FEC). La deuxième étape consiste à effectuer le routage et l'assignation de longueur d'onde. Les deux étapes de conception sont décrites dans les sous-sections suivantes.

2.4.2.1 Interconnexion des arbres de fibre optique

L'algorithme d'interconnexion d'arbres a pour but de placer des coupleurs à l'aide d'un algorithme génétique afin de créer des arbres de fibre. Les arbres de fibre sont obtenus à partir des données d'une topologie physique et d'une matrice de trafic avec les contraintes physiques du réseau à l'étude.

Cette section présente un aperçu de l'algorithme initial qui a été développé pour les applications terrestres et par la suite adapté aux réseaux optiques sous-marins dans le cadre de ce projet. L'algorithme est basé sur une métaheuristique appelée algorithme génétique. L'algorithme génétique (*Genetic Algorithm*, GA) est une méthode d'optimisation et de recherche. Cette méthode peut être classée dans la catégorie des algorithmes évolutionnaires qui reposent sur l'imitation de la nature d'une perspective darwinienne. Les algorithmes génétiques sont utilisés dans le but de rechercher une solution optimale dans un ensemble de solutions possibles pour un problème donné. En se basant sur le principe de sélection de Darwin, cet algorithme fait passer les solutions candidates dotées de bons attributs, après la création de chaque nouvelle génération, à travers des opérations de reproduction successives. Afin d'éviter que l'algorithme ne converge vers des solutions non optimales, l'algorithme effectue deux autres opérations, en plus de la reproduction, qui sont le croisement et la mutation. Ainsi, après plusieurs générations l'algorithme trouve des individus avec les meilleurs attributs; ces individus constituent une ou plusieurs solutions au problème.

Le schéma de la Figure 2.4 résume les différentes étapes de l'algorithme génétique. Ce dernier passe par deux grandes étapes. La première consiste à choisir une couleur pour chaque segment du réseau. Dans la deuxième partie, l'algorithme interconnecte les contacts

entre eux de telle façon à assurer une connectivité entre les nœuds sans créer de boucle laser. Un schéma détaillé des programmes est donné en Annexe II.

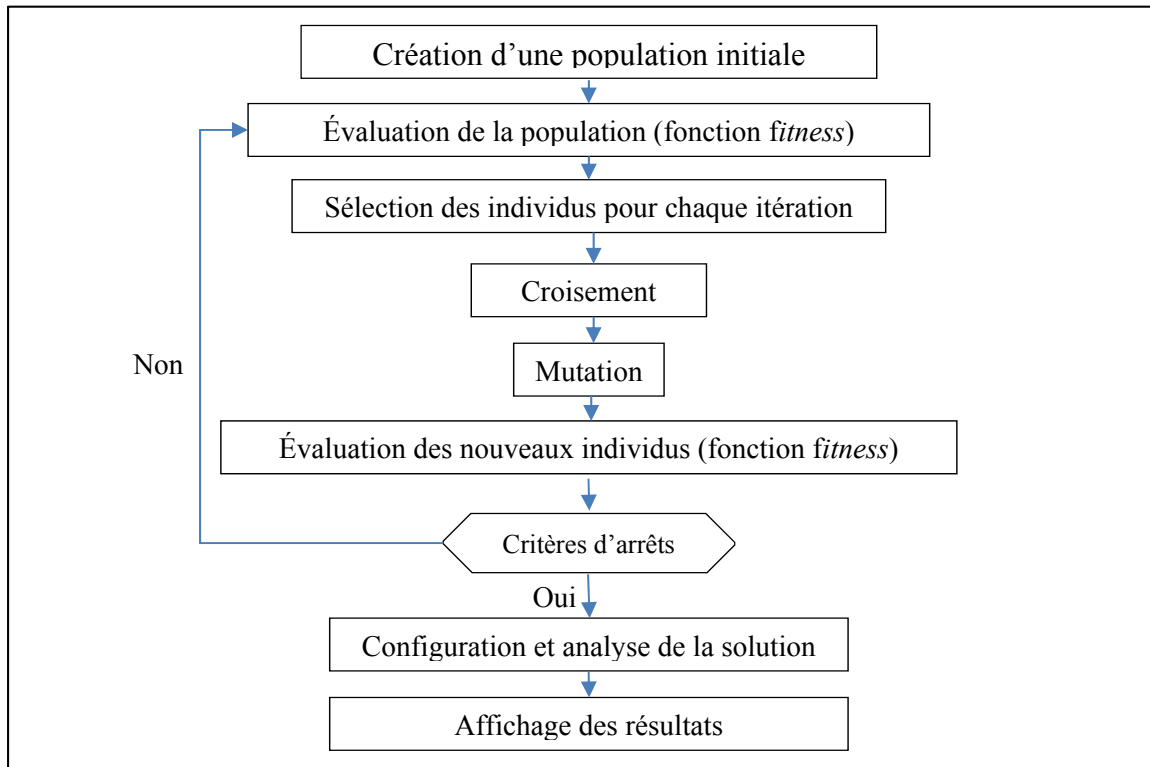


Figure 2.4 Les différentes étapes de l'algorithme génétique
Adaptée de O'Brien (2008)

Choisir une couleur pour un segment veut dire attribuer ce segment à un arbre de fibre. Il est possible d'avoir une solution avec une seule ou plusieurs couleurs. Le choix des couleurs se fait grâce aux algorithmes génétiques où les couleurs représentent les individus de chaque population, chaque population contient des individus différents. L'algorithme commence par attribuer de façon aléatoire à chaque population un certain nombre d'individus. Après chaque itération, l'algorithme évalue les individus grâce à la fonction *fitness*. La fonction *fitness* est donnée par :

$$\text{abs}(\sum F_t - \sum DF_t) + (1 - C) \quad (2.1)$$

où F_t : représente le nombre d'arbres de fibre

DF_t : le nombre d'arbres de fibres désiré

C : le ratio de connectivité des nœuds entre eux qui est définie par la relation

$$C = \frac{\sum \text{Connexion actuelle}}{\sum \text{connexion optimale}} \quad (2.2)$$

La connexion optimale (connectivité) est une matrice qui fait correspondre la valeur 1 aux paires de nœuds avec une demande non nulle et un lien direct entre ces deux nœuds (sans passer par un autre nœud). Les liens pris en considération dans ce cas sont les liens trouvés dans la matrice des liens qui a été générée avec l'outil M.1 de la Figure 2.1. La connexion actuelle fait correspondre la valeur 1 aux paires de nœuds avec une demande non nulle et un lien direct entre ces deux nœuds (sans passer par un autre nœud). Les liens utilisés pour ce cas sont tirés de la solution de chaque individu contrairement aux liens de la connexion optimale. Le ratio de connectivité C nous informe sur le degré de connectivité de chaque individu.

Afin d'obtenir des solutions, il est nécessaire de bien régler les paramètres d'entrée qui sont le nombre des individus de la population initiale, le nombre d'itérations, le nombre de couleurs de début et le nombre d'arbres. Dans le cas des réseaux optiques terrestres, la population initiale était de 100 individus; ce nombre n'est pas suffisant pour converger vers une solution dans le cas des réseaux optiques sous-marins à cause de la taille des réseaux. Dans un premier temps, cette valeur a été fixée à 200 individus. Par la suite, elle a été augmentée jusqu'à 1000 individus pour les plus grands réseaux. La valeur des autres paramètres n'a pas une grande influence sur la convergence de l'algorithme, à part le nombre d'itérations qui doit avoir une valeur d'au moins 80 itérations pour converger vers une solution optimale. La Figure 2.5 montre un exemple de problème qui a convergé après 80 itérations.

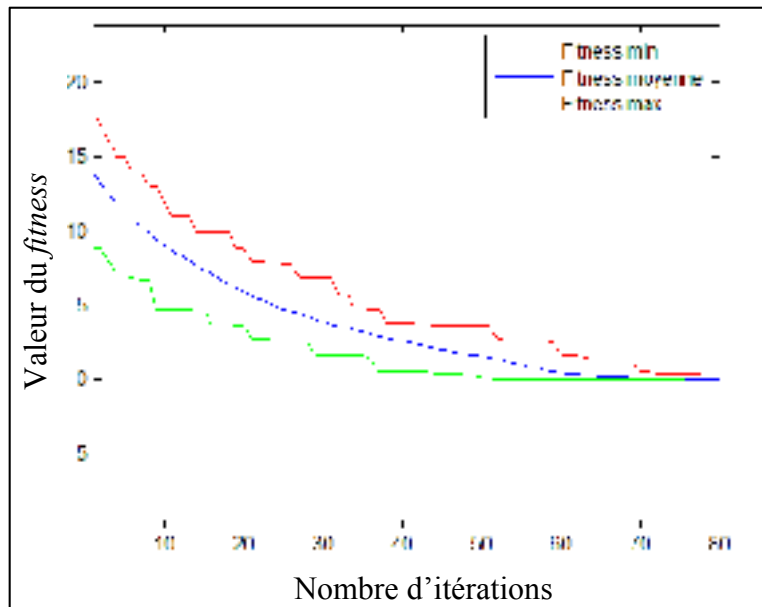


Figure 2.5 Évolution de la valeur minimale, moyenne et maximale du *fitness* en fonction du nombre d'itérations

Dans cet exemple, la valeur du *fitness* a atteint la valeur 0, ce qui veut dire que l'algorithme a convergé vers une solution. La courbe au milieu représente la valeur moyenne du *fitness* de toutes les populations d'individus. Les courbes supérieure et inférieure représentent la valeur maximale et minimale respectivement. Dans les cas où des valeurs de *fitness* supérieures à 1 sont obtenues, cela veut dire que l'algorithme n'a pas convergé vers une solution optimale.

À la fin de l'exécution du programme, il est possible d'obtenir plusieurs solutions valides. Cependant dans le cas sous-marin certaines de ces solutions sont invalides. Pour cause, un réseau sous-marin comprend des nœuds qui se trouvent sur la terre ferme, et d'autres nœuds immergés qui sont les BU et ne peuvent pas contenir des équipements complexes comme les terminaux. Pour éliminer ces cas, il faut éliminer les populations d'individus qui commencent ou se terminent par un BU. Dans le cas des architectures du type « tronc et branches », l'algorithme génère une seule solution avec un seul arbre de fibre si la longueur du réseau est inférieure à la portée du système.

La seule contrainte de la couche physique prise en compte dans l'algorithme d'interconnexion des arbres de fibres est la portée du système. Les contraintes prises en considération dans le présent travail lors de l'étude des réseaux sans filtre sont de 4 types :

- **la longueur des arbres de fibre** : la distance maximale entre le début et la fin de l'arbre limitée par la portée du système de transmission. Généralement la longueur des réseaux sous-marins peut dépasser une dizaine de milliers de kilomètres;

Dans le cadre de ce projet, les valeurs de la portée du système ont été ajustées de 1 500 km (système de transmission terrestre) aux valeurs spécifiées dans le Tableau 2.1 pour les systèmes sous-marins

Tableau 2.1 Caractéristiques typiques d'un système de transmission sous-marin à 100 Gbit/s
Tirée de Ciena (2013)

Modulation	Portée (km)	Largeur spectrale par canal (grille fixe)	Largeur spectrale par canal (grille flexible)
DP-BPSK	$\geq 7\ 000$	100 GHz	75 GHz
DP-QPSK	$< 7\ 000$	50 GHz	37.5 GHz

En plus des valeurs de portée, le tableau informe sur la largeur spectrale par canal pour une capacité de 100 Gbit/s. Dans le cas d'une grille flexible, la valeur d'un *Frequency Slot Unit* est égale à 12.5 GHz.

- **le nombre de longueurs d'onde** : le nombre maximum de longueurs d'onde par fibre est limité par la capacité du système. Il est possible d'avoir jusqu'à 80 longueurs d'onde par fibre dans la bande C. Ces longueurs d'onde seront partagées entre les différentes demandes. Si le nombre de canaux dépasse 80, alors il faut ajouter une autre fibre;
- **réutilisation de longueur d'onde** : limitée par l'architecture du système qui laisse passer les longueurs d'onde à cause de l'absence de filtre. Ceci conduit à l'accumulation de

l'émission spontanée amplifiée (ASE) et crée des canaux non filtrés. La Figure 2.6 illustre un exemple d'assignation de longueurs d'onde dans un réseau conventionnel. La Figure 2.7 présente l'assignation de longueurs d'onde dans un réseau sans filtre.

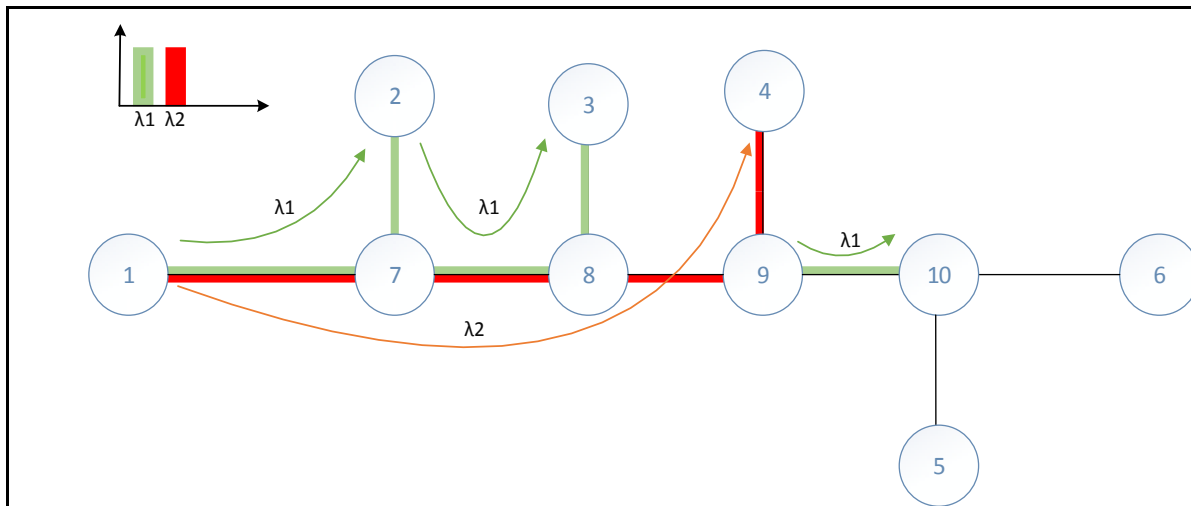


Figure 2.6 Assignment de longueur d'onde dans un réseau conventionnel

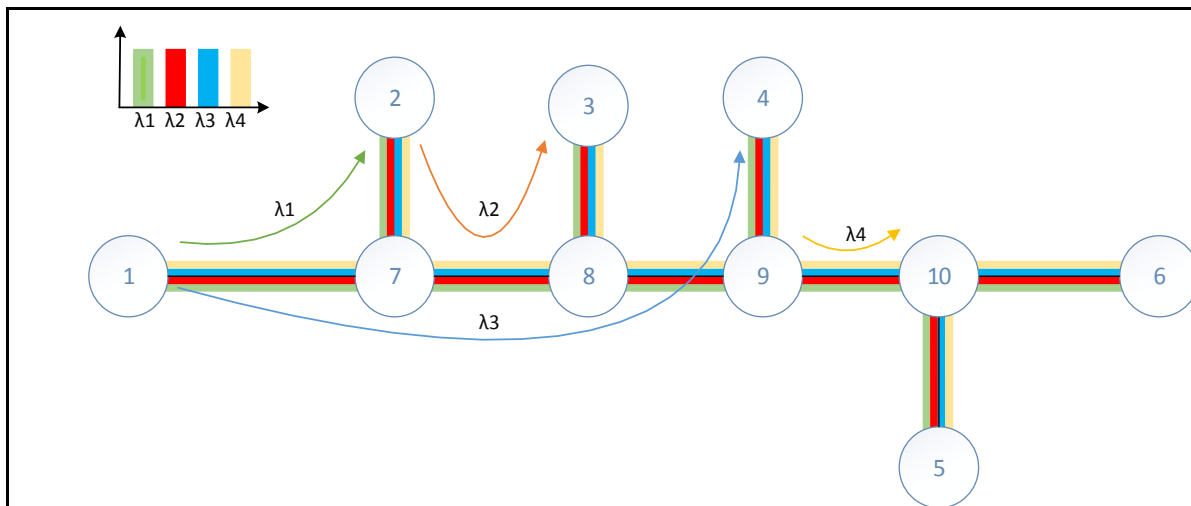


Figure 2.7 Assignment de longueurs d'onde dans un réseau sans filtre

Le même nombre de nœuds terrestre et le même nombre de demandes sont considérés pour les deux figures (Figure 2.6 et Figure 2.7). Si λ_1 est attribuée à la demande entre les nœuds 1-2, cette longueur d'onde va se propager, dans le cas d'un réseau conventionnel, du nœud 1

vers le nœud 2 en passant par le nœud 7. La présence des équipements d'insertion et d'extraction de longueurs d'onde au niveau des nœuds terrestres va permettre de réassigner cette longueur d'onde (λ_1) pour la demande 2-3 en passant par les nœuds 7 et 8, et l'assigner aussi entre les nœuds 9-10. Puisque la demande entre les nœuds 1-4 partage le même lien avec la demande entre les nœuds 2-3 alors la longueur d'onde λ_2 est utilisée pour la demande 1-4 (Figure 2.6). Par contre, ces longueurs d'onde seront présentes sur tous les liens en aval pour le cas sans filtre (Figure 2.7) de sorte que la connexion 9-10 devra être réalisée avec une 4^e longueur d'onde;

- **contrainte de la boucle laser** : la solution ne doit pas contenir de boucle fermée dans l'interconnexion des nœuds avec des diviseurs et des combineurs afin d'éviter les effets laser dans les liens amplifiés.

2.4.2.2 Routage et assignation de longueurs d'onde

La deuxième étape consiste à effectuer le routage et l'assignation de longueurs d'onde (*Routing and Wavelength Assignment*, RWA) dans l'architecture des arbres de fibres résultante. Le routage est effectué en sélectionnant le chemin le plus court parmi tous les arbres de fibre pour chaque connexion. Par la suite, le problème de l'assignation de longueur d'onde est résolu grâce au coloriage de graphe. Les résultats de routage sont transposés dans un graphe de conflit, où les nœuds du graphe représentent les demandes de connexion du réseau. Les nœuds dans le graphe de conflits sont reliés s'ils partagent au moins un lien physique commun dans leurs chemins. Par la suite, une métaheuristique appelée recherche tabou (O'Brien et al., 2008) est alors appliquée pour colorer le graphe des conflits. Colorer se traduit par attribuer des couleurs (longueurs d'onde) différentes aux connexions tout en veillant à ne pas attribuer la même couleur deux fois dans le même lien.

Le programme trouve le chemin le plus court parmi tous les arbres de fibre entre chaque paire de nœuds. La méthode utilisée est basée sur l'Algorithme de Dijkstra. Les mêmes

algorithmes développés auparavant (Archambault et al., 2010) pour trouver le plus court chemin ont été repris tels quels pour l'étude des réseaux sous-marins.

L'assignation de longueurs d'onde a été réalisée grâce à un algorithme de recherche tabou développé par (Archambault et al., 2010). Dans le cas des réseaux sous-marins, cet algorithme a été repris tel quel. La recherche tabou utilise une procédure de recherche locale pour se déplacer de manière itérative d'une solution potentielle vers une autre solution améliorée dans son voisinage, jusqu'à ce qu'un des critères d'arrêt soit satisfait. La recherche tabou explore le voisinage de chaque solution à chaque itération pour ensuite l'évaluer; la solution avec le meilleur score sera gardée. Les nouvelles solutions admises sont déterminées par l'utilisation de structures de mémoire qui contiennent des mouvements interdits afin d'empêcher le retour aux solutions précédentes. Ces structures de mémoire sont appelées « listes taboues », ils sont actualisés à chaque itération.

Les bloqueurs de longueur d'onde peuvent être ajoutés en tant que composants supplémentaires dans une solution sans filtre pour réduire le nombre de longueurs d'onde nécessaires afin de satisfaire à la demande de trafic. Ces bloqueurs de longueur d'onde créent des îlots de transparence dans le réseau et permettent la réutilisation des longueurs d'onde dans le même arbre de fibre. Un algorithme de placement des longueurs d'onde a été réalisé par (Archambault et al., 2010). Le but de l'algorithme est d'effectuer l'assignation des longueurs d'onde en prenant en considération l'ajout d'un ou de plusieurs bloqueurs.

2.4.3 Assignation du spectre pour la solution sans filtre

Les réseaux optiques élastiques (Gerstel et al., 2012) appelés aussi flexibles ou sans grille ont la capacité d'améliorer l'efficacité et l'utilisation du spectre. Puisque l'espacement entre les canaux ne dépend plus de la grille définie par l'organisme de télécommunication internationale (*International Telecommunication Union*, ITU), alors des largeurs variables de canal peuvent être attribuées aux demandes de trafic en fonction des exigences de capacité et de distance. Le problème d'assignation de la bande passante est connu sous le nom de :

routage et assignation du spectre (*Routing and Spectrum Assignment*, RSA). Dans les réseaux conventionnels, les technologies d'équipement qui permettent d'utiliser cette technique sont les transpondeurs à format de modulation variable et les WSS avec grille élastique (Gerstel et al., 2012).

Dans les réseaux sans filtre, le mode « sans grille » peut être réalisé sans avoir à déployer des WSS élastiques, qui sont à présent nettement plus chers que ceux qui fonctionnent avec une grille fixe. L'architecture passive des réseaux sans filtre en fait automatiquement des réseaux optiques qui sont intrinsèquement élastiques, à un coût nul. La Figure 2.8 montre comment on peut économiser du spectre dans un réseau avec une grille élastique.

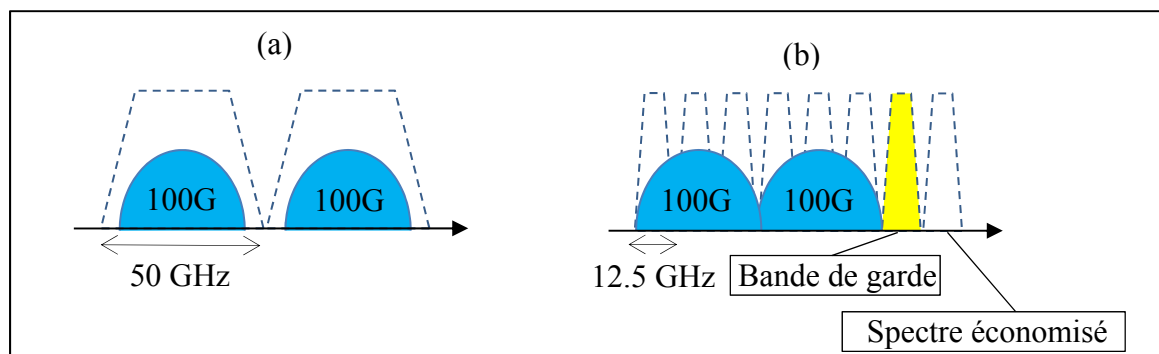


Figure 2.8 Spectre total occupé par deux canaux DP-QPSK à 100 Gbit/s dans un réseau:
(a) grille fixe (b) grille flexible de granularité égale à 12.5 GHz

À la Figure 2.8 (a), on peut voir 2 canaux dans une grille fixe de 50 GHz. Pour servir une demande de 200 Gbit/s, on a besoin de $2 \times 50 \text{ GHz} = 100 \text{ GHz}$ de spectre. Par contre dans une grille flexible (Figure 2.8 (b)), la même demande aura besoin de $6 \times 12.5 \text{ GHz} = 75 \text{ GHz}$ avec une bande de garde de 12.5 GHz. La demande de 200 Gbit/s a besoin de seulement 87.5 GHz de spectre dans le cas d'une grille flexible, soit 12.5 GHz de moins qu'avec une grille fixe.

2.5 Adaptation des outils

2.5.1 Création des nouveaux arbres

Les réseaux optiques sous-marins sont souvent de type tronc et branches. Ce sont des bus assez longs avec des branches tout au long de la liaison. La Figure 2.9 montre un exemple de solution obtenue avant la modification des algorithmes.

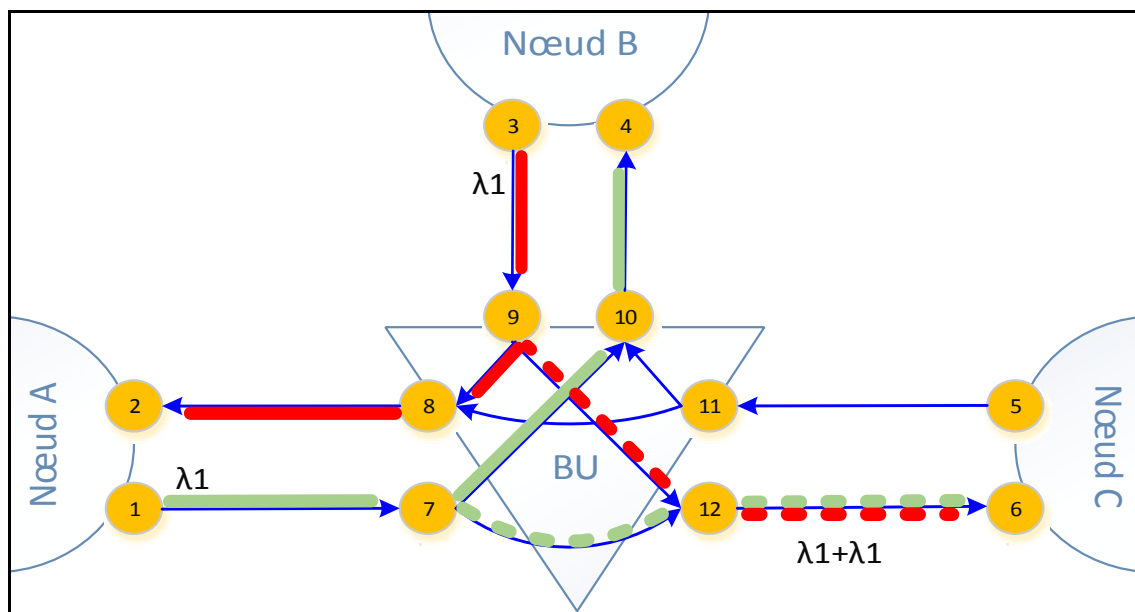


Figure 2.9 Solution de l'interconnexion d'arbres avant la modification des algorithmes (un seul arbre)

À la Figure 2.9, l'arbre de fibre est représenté par des flèches bleues. Les cercles sur fond orange numérotés sont des contacts, ils permettent le raccordement des différents liens. Deux connexions sont considérées à titre d'exemple. La première, du nœud A vers le nœud B passe par le segment constitué des contacts 1-7-10-4 (trait vert continu). La deuxième connexion, du nœud B vers le nœud A passe par le segment constitué des contacts 3-9-8-2 (trait rouge continu). Il est possible d'attribuer la même longueur d'onde λ_1 pour les deux connexions, car ces dernières ne passent pas par le même chemin (segments de contacts différents). Le problème qui se pose dans cet exemple concerne la partie non filtrée du signal. La partie du

signal qui continue à se propager en passant par des diviseurs optiques est appelée : canal non filtré (représenté par des traits rouges et verts avec des tirets). Le chevauchement des deux connexions au niveau du segment constitué des contacts 12-6 cause une accumulation de puissance ($\lambda_1 + \lambda_1$). Cette accumulation ne peut être tolérée en l'absence de dispositif actif dans le BU pour gérer le niveau de puissance par canal comme le ferait un égaliseur de gains variable ou un bloqueur de longueurs d'onde. Pour remédier à ce problème, la solution de la Figure 2.10 a été proposée.

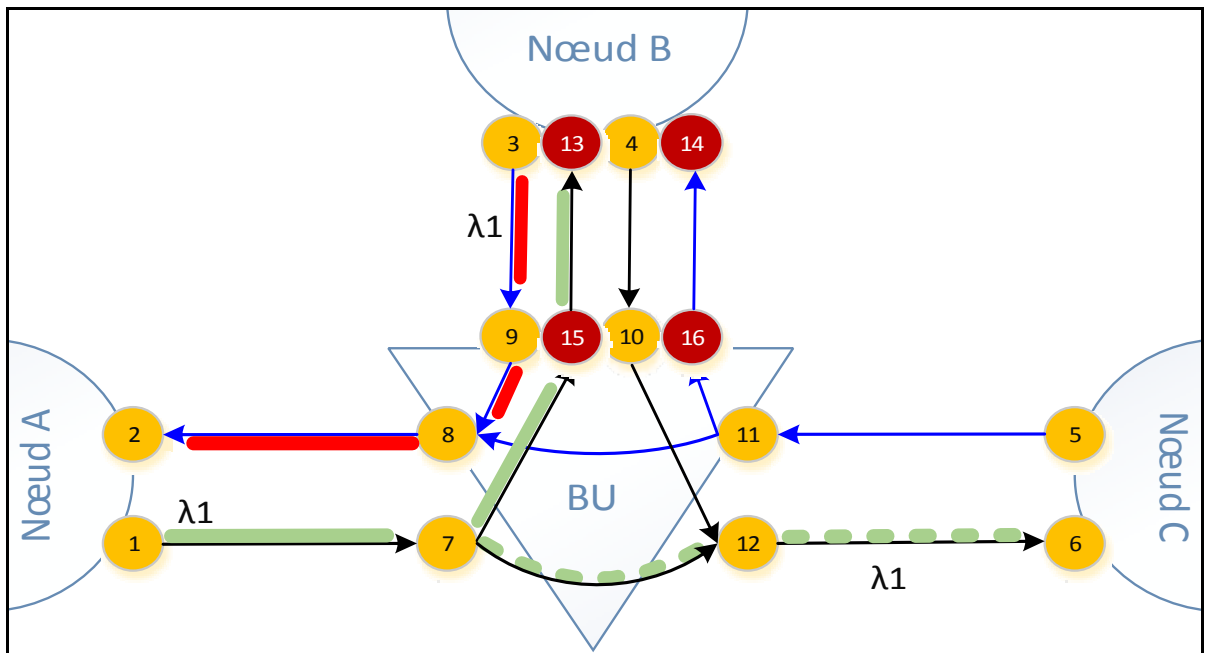


Figure 2.10 Solution de l'interconnexion d'arbres après modification des algorithmes (2 arbres)

À la Figure 2.10, deux arbres de fibre sont représentés par des flèches bleues pour le premier arbre et noires pour le deuxième. 4 nouveaux contacts (13, 14, 15 et 16) ont été ajoutés, deux au niveau du nœud B et deux au niveau du BU. Les deux connexions se trouvent dans deux arbres différents dans l'exemple de la Figure 2.10. Le nouveau chemin qu'emprunte la première connexion dans cet exemple est constitué des contacts 1-7-15-13 appartenant à l'arbre de fibre de couleur noire. Cette nouvelle configuration permet d'utiliser la même

longueur d'onde du nœud A vers B et du nœud B vers A, car il n'y a pas de chevauchement des parties non filtrées.

2.5.2 Portée du système de transmission et régénération

Dans l'algorithme d'interconnexion initial, la portée du système de transmission est le seul paramètre qui permet de limiter la longueur des arbres de fibres. La longueur maximale d'un arbre de fibre était limitée à 1500 km dans les applications terrestres, car les systèmes de transmission terrestres ont une portée typique de l'ordre de 1500 km. Dans le cas sous-marin, les réseaux peuvent facilement dépasser une dizaine de milliers de kilomètres. Les formats de modulation DP-BPSK et DP-QPSK permettent d'atteindre des distances transocéaniques sans régénération. Ainsi, la contrainte sur la longueur maximale des arbres a été ajustée à 12000 km pour le format de modulation DP-BPSK et 7000 km pour le DP-QPSK (Collings, 2013) (Infinera, 2012).

Un ajustement de l'algorithme et de la matrice de trafic est nécessaire afin d'obtenir des solutions sans filtre avec régénération, l'exemple de la Figure 2.11 montre un réseau sans filtre qui dépasse la portée maximale sans régénération.

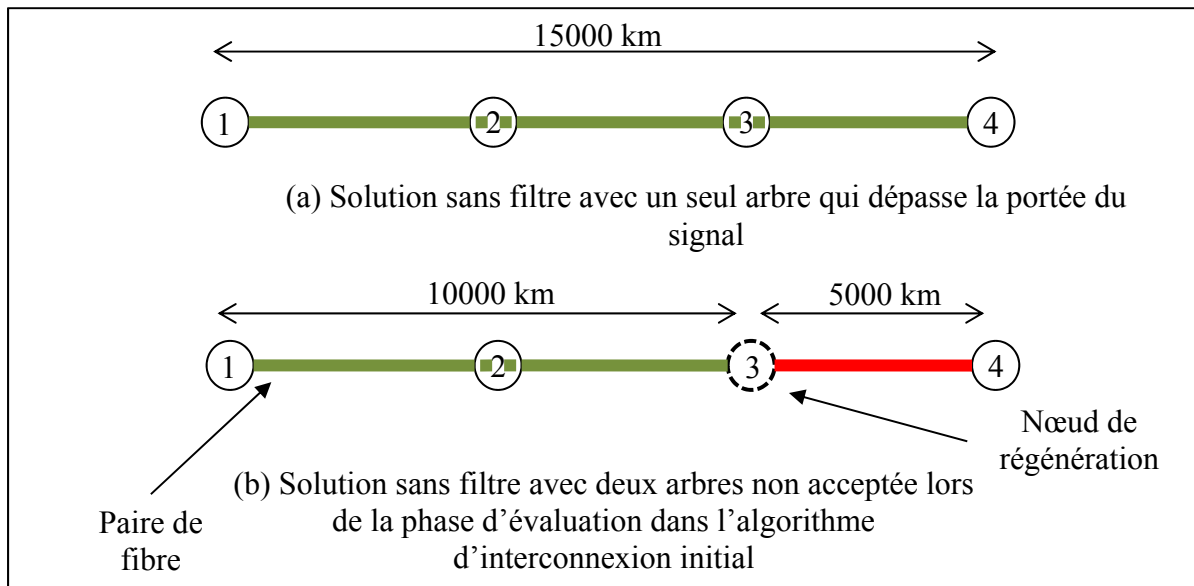


Figure 2.11 Solution sans filtre : (a) sans régénération (b) avec régénération

À la Figure 2.11 on peut voir la première solution (a) qui dépasse la portée du système de transmission. La solution est constituée d'un seul arbre de fibre qui passe par tous les nœuds. Afin d'obtenir cette solution, la longueur maximale des arbres doit être ajustée à plus de 15000 km. Dans la Figure 2.11 (b) la solution comprend deux arbres de fibres avec une discontinuité au niveau du nœud 3, ainsi le signal peut être régénéré en passant par des transpondeurs à l'intérieur du nœud 3. Par contre l'algorithme initial d'interconnexion d'arbres ne permet pas d'obtenir cette solution, car la solution est éliminée dans la phase d'évaluation des individus de l'algorithme génétique initial. Pour cause, il n'y a pas de connexion directe entre le nœud 4 et le nœud 1 dans la solution de la Figure 2.11(b). Pour remédier à ce problème, il est nécessaire de modifier la partie *évaluation* de l'algorithme génétique afin d'accepter les solutions avec des nœuds qui ne sont pas interconnectés directement entre eux.

Il est possible avec cet ajustement de générer de nouvelles solutions où on peut placer des régénérateurs à tous les nœuds terrestres. Mais, dans certains cas, cela peut conduire à un nombre élevé de points de régénération et à un grand nombre de solutions. Afin de remédier à ce problème, on ajoute comme paramètre d'entrée l'emplacement des sites de régénération. Cela permet de passer d'une centaine de solutions à 4 ou 5 solutions. Il est à noter que le nombre d'individus dans l'algorithme génétique doit être augmenté si on augmente le nombre de nœuds avec régénération. Par exemple, afin d'obtenir des résultats il est nécessaire de passer de 200 individus pour un seul nœud de régénération à 1000 individus pour 3 nœuds de régénération.

Après l'ajout des nœuds de régénération, il est impératif aussi de transformer la matrice de trafic afin que les demandes soient regroupées aux points de régénération. Dans l'exemple de la Figure 2.11 (b), la demande entre les nœuds 1 et 4 est additionnée à la demande entre les nœuds 1 et 3 et aussi à la demande entre les nœuds 3 et 4. Soit la matrice de demande unitaire (exprimé en unités de 100G) ci-dessous :

Nœuds	1	2	3	4
1	0	1	1	1
2	1	0	1	1
3	1	1	0	1
4	1	1	1	0

Figure 2.12 Matrice de trafic unitaire

Cette matrice contient le trafic qui doit être satisfait. S'il y a régénération au niveau du nœud 3 dans ce cas la matrice devient :

Nœuds	1	2	3	4
1	0	1	2	0
2	1	0	2	0
3	2	2	0	3
4	0	0	3	0

Figure 2.13 Matrice de trafic unitaire après régénération au nœud 3

La présence des sites de régénération fait augmenter le nombre de demandes dans la matrice, et aussi les coûts à cause de l'ajout de transpondeurs pour la régénération. Le nombre de longueurs d'onde est par contre diminué à cause de la réutilisation des longueurs d'onde après chaque site de régénération.

2.5.3 Matrice de trafic

Une matrice de trafic est la matrice qui représente le trafic entre deux nœuds (normalement en Gbit/s). La matrice de demandes contient le nombre de canaux requis entre les paires de nœuds. Le nombre de canaux est calculé à partir de la matrice de trafic et des caractéristiques du système de transmission selon la formule suivante :

$$\text{Nombre de canaux} = \text{Arrondi supérieur} \left(\frac{\text{Trafic}}{\text{capacité par canal}} \right) \quad (2.3)$$

Si par exemple le trafic entre deux nœuds est de 160 Gbit/s et la capacité par canal est de 100 Gbit/s, alors le nombre de canaux est égal à 2.

Afin de calculer la consommation sur plusieurs périodes, un algorithme qui génère des matrices de trafic à partir d'une matrice de trafic initiale TM^1 a été développé. Le trafic de chaque période (n) est calculé à partir du trafic de la période précédente ($n-1$) pour chaque matrice TM^n . L'évolution du trafic concerne les populations d'utilisateurs des *nœuds* sources p_i et des nœuds destinations p_j , et leurs taux de croissance de trafic respectif g_i et g_j . Le calcul de chaque élément (d_{ij}^n) de la matrice TM^n se fait par la formule suivante :

$$d_{ij}^n = d_{ij}^{n-1} \times \left(1 + \left(\frac{P_i \times g_i + P_j \times g_j}{P_i + P_j} \right) \right) \quad (2.4)$$

Une matrice de trafic initial TM^1 (exprimée en Gbit/s) qui comprend un total de 4 demandes pour un réseau composé de deux nœuds est donnée en exemple à la figure Figure 2.14

	Nœud 1	Nœud 2
Nœud 1	$d_{1,2}^1 = 190 \text{ Gbit/s}$	0
Nœud 2	0	$d_{2,2}^1 = 190 \text{ Gbit/s}$

Figure 2.14 Exemple d'une matrice de trafic initiale TM^1 pour un réseau composé de deux nœuds

Au Tableau 2.2, un exemple de données d'entrées tirées de (Ciena, 2013) utilisées pour le calcul des périodes de trafic.

Tableau 2.2 Exemple de données pour le calcul des périodes de trafic

Nœuds	1	2
Croissance du trafic (g) [%]	35	2
population d'utilisateurs (p) [Millions]	50	5

Pour la deuxième période de trafic, l'élément $d_{1,2}^2$ est calculé comme suit :

$$d_{1,2}^2 = 190 \times \left(1 + \left(\frac{(50 \times 0.35) + (5 \times 0.02)}{50 + 5} \right) \right) = 250.8 \text{ Gbit/s}$$

2.6 Calcul du coût des solutions conventionnelle et sans filtre

Pour les deux solutions, sans filtre et conventionnelle, le coût total du réseau a été évalué par le calcul des éléments supplémentaires dans les parties qui se trouvent sur terre et les parties submergées. Les coûts unitaires des équipements terminaux (Tableau 2.3) sont normalisés au coût d'un modem de 100 Gbit/s DP-QPSK, tandis que les coûts unitaires de l'équipement de ligne (Tableau 2.4) sont normalisés au coût par kilomètre d'un câble en haute mer (câble non blindé) de 3 paires de fibres. Le coût du câble dépend du nombre de paires de fibres, ainsi que sur le type de câble (câble doublement blindé, câble blindé et câble non blindé) afin de refléter des conditions de déploiement réalistes. Le coût des répéteurs (amplificateurs) dépend également du nombre de paires de fibres. Le même coût est supposé pour les BU des deux solutions conventionnelles et sans filtre.

Tableau 2.3 Prix unitaire des équipements terminaux des réseaux sous-marins
Tiré de Ciena (2013)

Équipements terminaux	Prix unitaire (a.u.)
WSS	1,25
WSS élastique	1,9
MUX/DEMUX (1 x 30)	0,31
Diviseur/Combineur (1 x 32)	0,16
Amplificateurs optique (EDFA)	0,62
Bloqueurs de longueurs d'onde (WB)	1

Tableau 2.4 Prix unitaire des équipements de ligne des réseaux sous-marins
Tiré de Ciena (2013)

Équipements de ligne		Prix unitaire (a.u.)
Câble 2 PF/ 3 PF / 4 PF	câble non blindé	0,9/ 1,1 / 2,3
	câble blindé	1 / 1,2 / 2,5
	câble doublement blindé	1,1 / 1,3 / 2,7
Amplificateurs	2 PF	60
	3 PF	70
	4 PF	80

Dans cette étude, les réseaux sans filtre sont équipés de diviseurs/combineurs de 1×32 au niveau d'un nœud terrestre (Figure 2.15 (a)). Les pertes des diviseurs/combineurs sont compensées par des amplificateurs EDFA. Le nombre de diviseurs/combineurs (32 canaux) dépend du degré du nœud et du nombre de paires de fibres. Un nœud terrestre, dans le cas d'une solution conventionnelle (Figure 2.15 (b)), est composé de WSS, de multiplexeurs (30 canaux) et des amplificateurs EDFA. Le nombre de WSS dépend du nombre de paires de fibres. Le nombre de multiplexeurs se calcule à partir du nombre de paires de fibres et du degré du nœud.

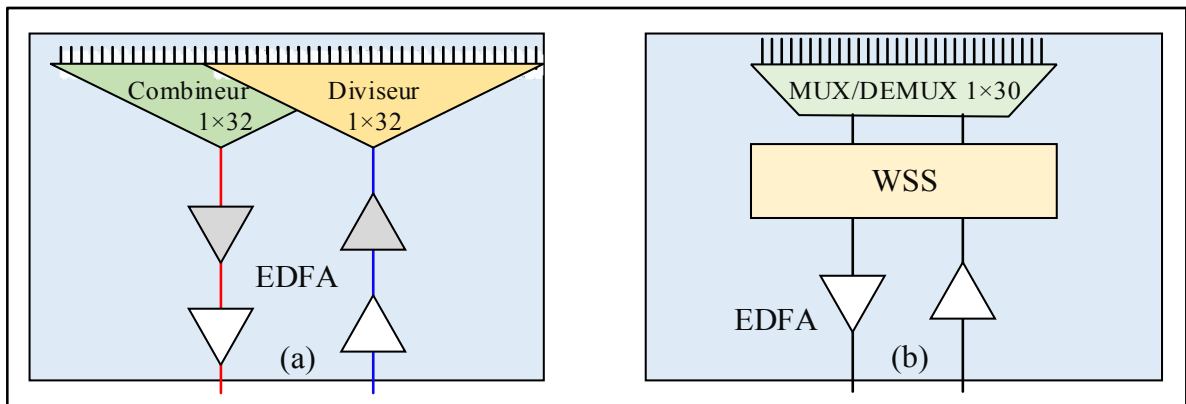


Figure 2.15 configuration d'un nœud terrestre : (a) sans filtre (b) conventionnelle

À la Figure 2.15 est illustrée la configuration d'un nœud terrestre dans les deux cas (sans filtre et conventionnelle) avec une seule paire de fibres et un seul degré de connexion. La méthode de calcul du coût de la partie terrestre est expliquée dans le schéma de la Figure

2.16 pour la solution sans filtre et la Figure 2.17 pour la solution conventionnelle. Le calcul a été fait par des tableaux dans *Microsoft Excel®*.

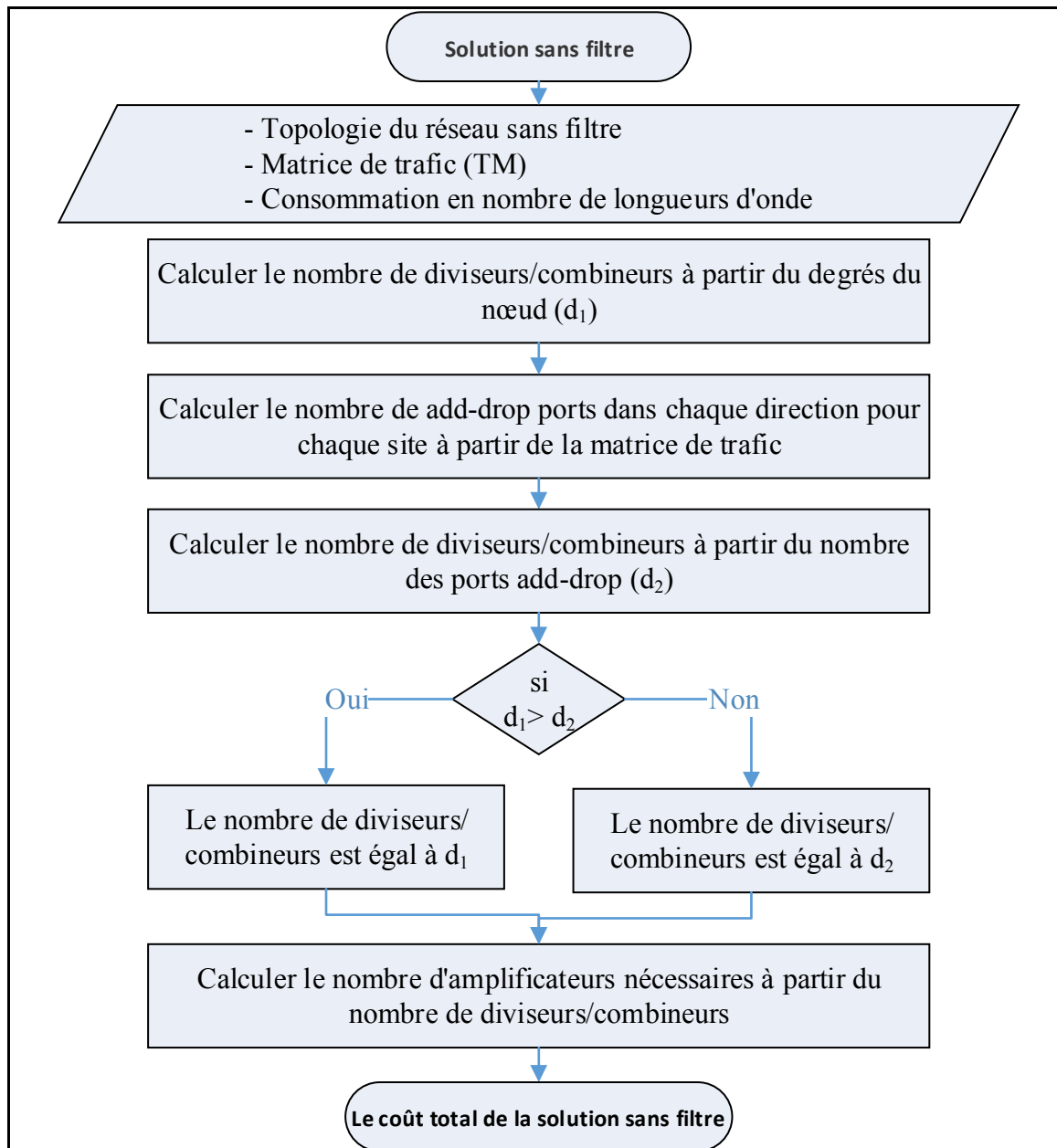


Figure 2.16 Calcul des coûts pour un nœud terrestre dans le cas sans filtre
Tirée de Nabet (2015)

Le calcul du nombre de diviseurs/combineurs se fait par la comparaison des valeurs d_1 et d_2 . La valeur de d_1 se calcule à partir du nombre de nœuds et du nombre de paires de fibres à l'entrée du nœud. La valeur de d_2 se calcule à partir de la matrice de trafic TM par la formule suivante :

$$d_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \text{arrondi supérieur} \left(\frac{\sum_{j=1}^N TM(k)_{i,j}}{32} \right) \quad (2.5)$$

Où $TM(k)$ est une matrice, contenant uniquement les éléments i et j de la matrice de trafic TM appartenant à l'arbre de fibre k . N est le nombre total de nœuds et K est le nombre d'arbres de fibre.

Par la suite, la valeur supérieure entre d_1 et d_2 définit le nombre final de diviseurs/combineurs. Puisqu'on a besoin de quatre amplificateurs pour chaque diviseur/combineur, alors le nombre d'amplificateurs est égal au double de la valeur maximale entre d_1 et d_2 . Le cout total d'une solution sans filtre est donné en détail dans le chapitre 3.

Dans le cas des réseaux conventionnels, la méthode de calcul est présentée dans la Figure 2.17.

Le nombre de WSS est égal au nombre d'entrées de paires de fibres pour chaque nœud. Par la suite, le calcul du nombre de Mux/Demux se fait par la comparaison des valeurs m_1 et m_2 . La valeur de m_1 se calcule à partir du nombre de nœuds et du nombre de paires de fibres à l'entrée du nœud. La valeur de m_2 se calcule à partir de la matrice de trafic TM par la formule suivante :

$$m_2 = \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^N \left[\text{arrondi} \left(\frac{\sum_{j=1}^i TM}{30} \right) + \text{arrondi} \left(\frac{\sum_{j=i+1}^N TM}{30} \right) \right] \quad (2.6)$$

Où F représente le nombre total de paires de fibres et N le nombre de nœuds.

Par la suite, la valeur supérieure entre m_1 et m_2 définit le nombre final de Mux/Demux. Le coût total d'une solution conventionnelle est donné en détail dans le chapitre 3.

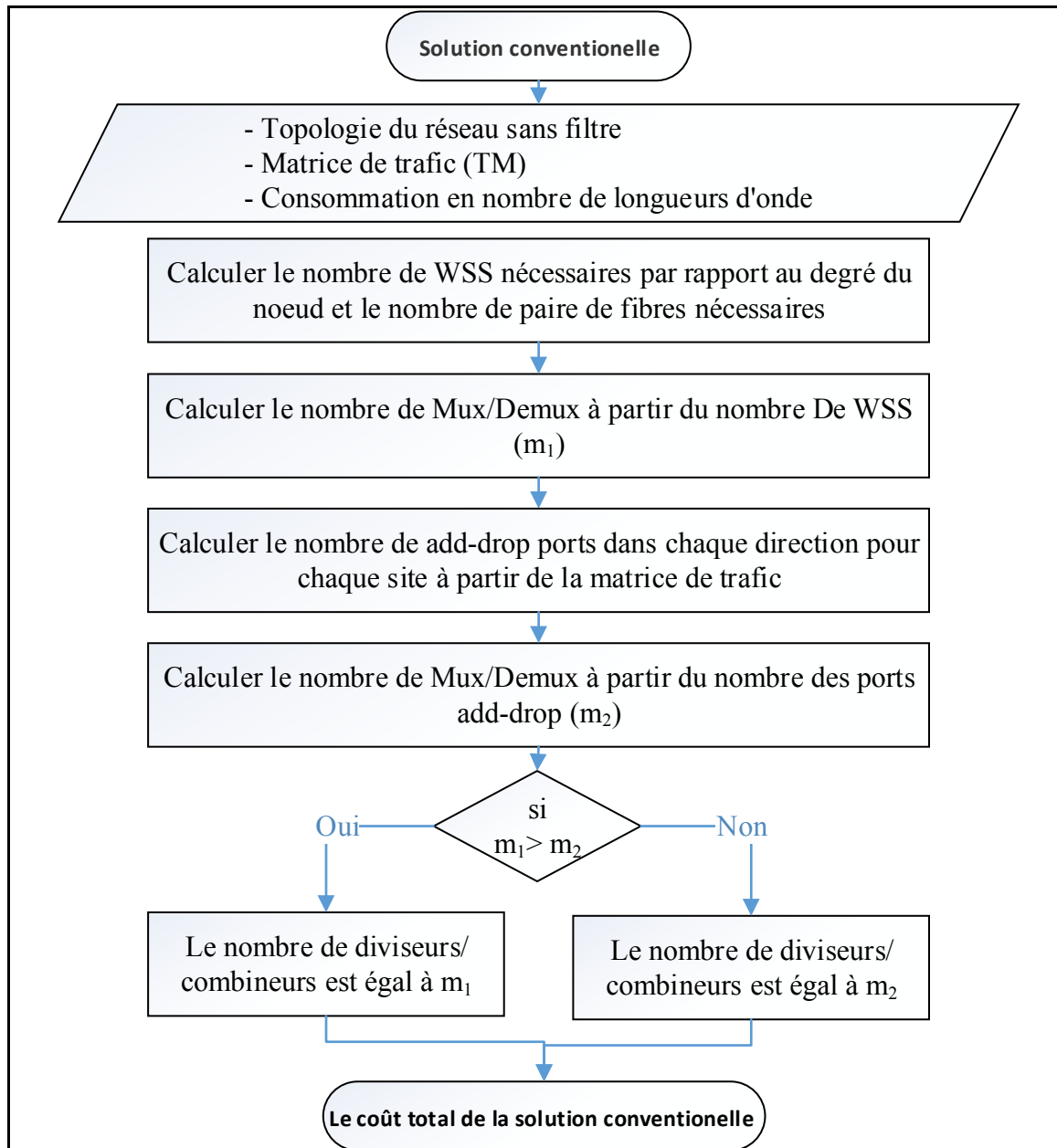


Figure 2.17 Calcul des coûts pour un nœud terrestre dans le cas d'une solution conventionnelle
Tirée de Nabet (2015)

2.7 Ciena Optical Planner™

Ciena Optical Planner™ est le logiciel de simulation de réseaux optiques qui a été utilisé pour évaluer les réseaux conventionnels et les comparer du point de vue de la consommation

de longueurs d'onde aux solutions sans filtre. Le logiciel dispose de plusieurs fonctionnalités pour créer un réseau, effectuer le routage, assigner des longueurs d'onde et analyser les résultats.

La création d'une topologie se fait moyennant une interface graphique qui permet de positionner facilement les différents équipements puis les relier par des fibres. La figure ci-dessous illustre un exemple de réseau avec *Ciena Optical Planner*TM.

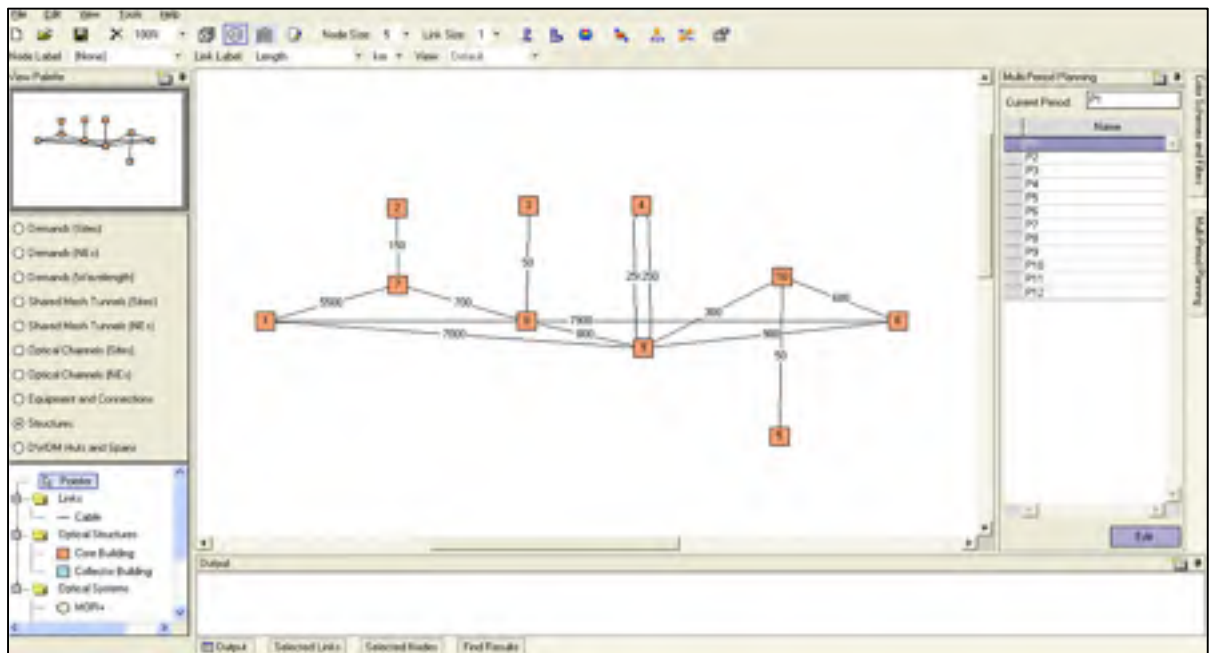


Figure 2.18 Exemple de réseau sur *Ciena Optical Planner*TM

*Ciena Optical Planner*TM offre la possibilité de simuler des scénarios d'évolution de trafic sur plusieurs périodes pour un réseau conventionnel. Ces résultats obtenus sont comparés avec les résultats de la simulation des réseaux sans filtre sous MATLAB®.

2.7.1 Interface d'intégration de données MATLAB® dans *Ciena Optical Planner*TM

Un programme MATLAB® a été développé pour générer les entrées nécessaires pour la solution conventionnelle qui est simulée ensuite dans *Ciena Optical Planner*TM. Deux façons

existent pour entrer les données que l'on veut utiliser dans *Ciena Optical Planner*[™], tels que le trafic, le nombre de périodes et les nœuds source et destination. La première consiste à faire entrer les données manuellement depuis l'interface graphique illustré à la Figure 2.18. La seconde consiste à créer des fichiers texte séparés par des virgules (*Comma Separated Value*, CSV) contenant des données tabulées. Chaque colonne dans un tableau donné correspond à un type de donnée, à savoir des informations sur les nœuds sources et destinations ainsi que sur le trafic. Si le réseau en question est grand, alors des milliers de données seront insérées, de ce fait un programme a été écrit afin d'extraire directement les données à partir de MATLAB® et les transformer automatiquement en fichiers d'entrées reconnaissables par *Ciena Optical Planner*[™]. Ce programme fait gagner énormément de temps, ce qui permet de diminuer le temps de traitement des données. Comme paramètres d'entrée, le fichier doit contenir la matrice de trafic et le nombre de périodes, par la suite, *Ciena Optical Planner*[™] simule la solution période par période. Un exemple de l'en-tête d'un fichier est donné en Annexe I.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET ANALYSES

Dans ce chapitre, les topologies physiques sans filtre et conventionnelles de trois réseaux sous-marins (*long haul*, régional et en anneau) sont présentées. Pour chaque réseau, une analyse des coûts et de la capacité a été effectuée selon les outils présentés dans le chapitre précédent. Les analyses sont présentées pour les deux cas à l'étude, le cas des réseaux avec une grille fixe et le cas des réseaux élastiques.

3.1 Réseau sous-marin *long haul*

La Figure 3.1 illustre un réseau sous-marin conventionnel typique avec un tronc et des branches (Ciena, 2013). Dans cet exemple, le réseau sous-marin conventionnel *long haul* (LH) comprend 6 stations terrestres qui sont reliées entre elles par un système de ligne optique sous-marin à trois câbles. La distance entre les stations terrestres 1 et 6 est fixée à 8000 km, ce qui peut être considéré comme une valeur typique pour ce type de réseau (Bergano, 2005). Les stations terrestres sont équipées de stations d'atterrissage de câbles (*Submarine Line Terminal Equipment*, SLTE). Chaque SLTE comprend des transpondeurs, des multiplexeurs, des ROADM basés sur des WSS, ainsi que des amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA) pour compenser la perte d'insertion du multiplexeur et du WSS.

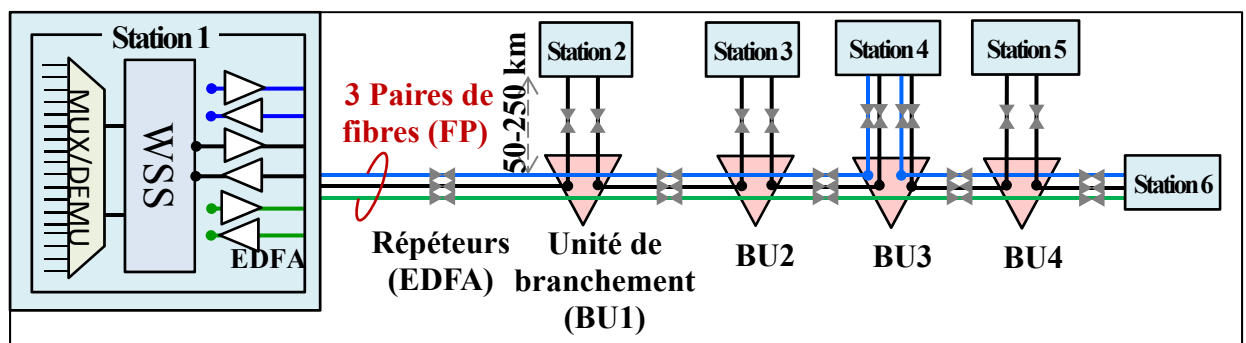


Figure 3.1 Architecture conventionnelle à trois paires de fibres (3 FP) pour la topologie du réseau sous-marin *long haul*
Tirée de Ciena (2013)

Le système de ligne optique est composé d'un tronc principal composé de 3 paires de fibres entre les stations terrestres 1 et 6 et de quatre BU raccordant les stations 2, 3, 4 et 5 au tronc principal. Les stations 2 et 4 sont reliées au tronc principal par 4 paires de fibres tandis que les autres stations sont reliées par 2 paires de fibres seulement. Comme le montre la Figure 3.1, les BU sont composés de points de connexion de fibre fixes, fournissant une connectivité entre des stations (nœuds) terrestres spécifiques. Dans un tel réseau, les 3 paires de fibres seraient généralement utilisées par différents opérateurs de réseau (Terabit.C, 2014).

Dans cette architecture conventionnelle de réseau sous-marin, l'interconnexion de base entre les 6 nœuds est réalisée par la paire de fibres noire. La paire verte est un lien direct entre les nœuds terrestres 1 et 6. La paire bleue interconnecte un sous-ensemble de nœuds terrestres (1, 4 et 6). Ces deux paires supplémentaires (verte, bleue) sont utilisées pour transporter le trafic entre les nœuds spécifiques ainsi que pour fournir une protection contre les pannes par le transfert du trafic sur les paires de fibres alternatives.

Le Tableau 3.1 montre la matrice de trafic utilisée pour cette topologie. La matrice de trafic, exprimé en nombre de longueurs d'onde de 100 Gbit/s, est non uniforme et comprend un total de 134 demandes (Trafic total =13,4 Tbit/s) (Ciena, 2013).

Tableau 3.1 Trafic total entre les 6 stations du réseau sous-marin *long haul*
(longueurs d'onde de 100 Gbit/s) Total : 134 demandes (Trafic total = 13.4 Tbit/s)
Tiré de Ciena (2013)

nœud	1	2	3	4	5	6
1	0	2	2	18	4	17
2	2	0	1	1	1	2
3	2	1	0	1	2	1
4	18	1	1	0	2	9
5	4	1	2	2	0	4
6	17	2	1	9	4	0

3.1.1 Solution sans filtre proposée

La solution sans filtre proposée pour la topologie de réseau sous-marin illustrée à la Figure 3.1 est présentée à la Figure 3.2. Les résultats ont été obtenus par l'utilisation d'une version des outils de conception sans filtre adaptés selon les principes expliqués au chapitre précédent.

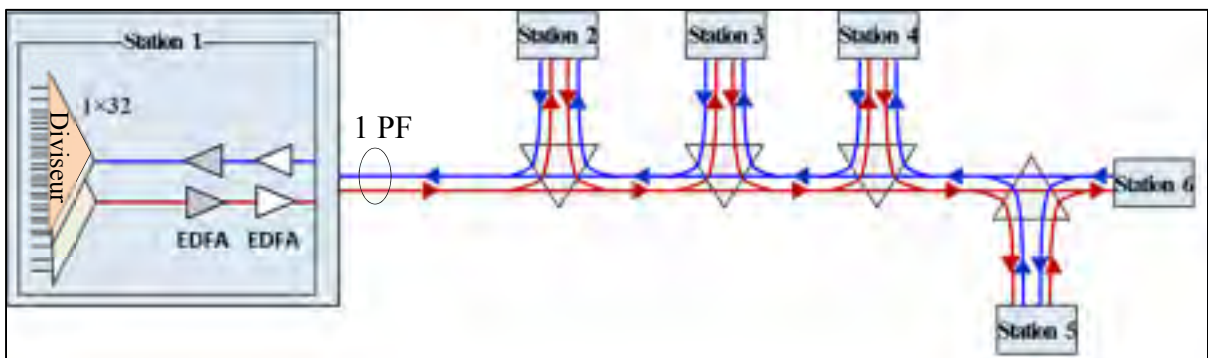


Figure 3.2 Solution sans filtre pour la topologie du réseau sous-marin *long haul*

Deux arbres de fibres (rouge et bleu) sont utilisés pour transporter les 13,4 Tbit/s de trafic inclus dans la matrice de trafic global entre les 6 stations terrestres. La longueur de chacun des deux arbres de fibres est de 8000 km. Les multiplexeurs, les démultiplexeurs et les WSS sont remplacés par des diviseurs/combineurs passifs 1×32. Deux EDFA supplémentaires sont utilisés pour compenser la perte d'insertion des diviseurs/combineurs. Les 4 unités de branchement sont équipées de simples coupleurs 1×2 pour le raccordement des branches au tronc principal. Dans chaque arbre de la fibre, le trafic en provenance des nœuds en amont est diffusé à tous les nœuds en aval, ce qui génère des canaux non filtrés (Mantelet et al., 2013). La solution sans filtre ne nécessite qu'une seule paire de fibres pour transporter 13,4 Tbit/s de trafic.

3.1.2 Analyse des coûts

Une analyse comparative des coûts de la solution sous-marine sans filtre (Figure 3.2) et des coûts de la solution conventionnelle (Figure 3.1) pour 13,4 Tbit/s de trafic est présentée dans

cette section. La méthode de calcul des coûts a été appliquée selon le principe expliqué dans la section 2.6. La solution conventionnelle du réseau sous-marin considérée dans cette étude (voir Figure 3.1) comprend des terminaux équipés de WSS qui effectuent un routage par longueur d'onde dans le domaine optique. Afin d'atteindre une capacité de commutation complète, un WSS est connecté à chaque fibre de sortie; Un total de δ WSS est donc nécessaire à un nœud avec un degré nodal de δ . Les hypothèses de coûts pour les terminaux et les systèmes optiques de ligne sont répertoriées dans le Tableau 3.2 et le Tableau 3.3 respectivement (Ciena, 2013) (Archambault et al., 2010).

Tableau 3.2 Coûts relatifs des équipements de terminal des solutions sans filtre et conventionnelle pour le réseau *Long Haul* par rapport à un modem QPSK à 100 Gbit/s

Solution ⁽¹⁾	Équipements de terminal	Quantité	Coût unitaire (a.u.)⁽²⁾	Coût total (a.u.)
Conventionnelle	WSS	16	1.25	20
	Mux/Demux 1x30	32	0.31	9.9
	Total			29.92
Sans filtre	Diviseurs 1x32	24	0.16	3.84
	EDFA	24	0.62	14.88
	Total			19.04

⁽¹⁾ trafic total de 13.4 Tbit/s (espacement inter-canal = 50 GHz).

⁽²⁾ coûts unitaires normalisés au coût d'un modem QPSK à 100 Gbit/s (Ciena, 2013).

Les coûts unitaires de l'équipement terminal sont normalisés au coût d'un modem 100 Gbit/s DP-QPSK, tandis que les coûts unitaires de l'équipement de ligne sont normalisés au coût par km d'un câble pour les eaux profondes de 3 paires de fibres. Afin de refléter des conditions réalistes de déploiement, le nombre de paires de fibres ainsi que le type de câble (eau profonde, blindé ou continental) ont été pris en compte dans le calcul du coût du câble. Le coût des amplificateurs est fonction également du nombre de paires de fibres. Le coût des BU est supposé être le même, que la solution soit conventionnelle ou sans filtre.

Tableau 3.3 Coûts relatifs des équipements de ligne des solutions sans filtre et conventionnelle pour le réseau *long haul*

Solution⁽¹⁾	Équipements de ligne	Quantité	Coût unitaire (a.u.)(2)	Coût total (a.u.)
Conventionnelle	Câble 2 PF / 3 PF / 4 PF	8 400 km	1 / 1.2 / 2.5	8 580.5
	Amplificateurs 2 PF / 3 PF / 4 PF	2 / 133 / 4	60 / 70 / 80	9 750
	Total			18 330.5
Sans filtre	Câble 2 PF / 4 PF	8 400 km	0.9/ 1.1/ 2.3	7 733
	Amplificateurs 2 PF / 4 PF	133 / 6	60 / 80	8 400
	Total			16 113

⁽¹⁾ trafic total de 13.4 Tbit/s (espacement inter-canal = 50 GHz).

⁽²⁾ coûts unitaires normalisés au coût d'un modem QPSK à 100 Gbit/s (Ciena, 2013).

Pour la solution sans filtre et la solution conventionnelle, le coût total du réseau a été évalué en ne prenant en compte que les éléments supplémentaires ou différents dans les parties terrestres et submergées. Les coûts totaux des réseaux conventionnels et sans filtre, pour les parties terrestres et les parties submergées, sont indiqués dans le Tableau 3.2 et le Tableau 3.3, respectivement. Une comparaison des coûts montre une économie de 37 % de coûts dans l'équipement de terminal et une économie de 12 % dans l'équipement de ligne pour la solution sans filtre. Les économies de coûts dans les terminaux résultent de l'architecture passive de nœud des réseaux sans filtre. Le coût du système de ligne sans filtre a été évalué en considérant que le nombre minimum de paires de fibres par câble est égal à 2. Dans la mesure où il est possible d'accommoder le trafic dans une solution sans filtre à une seule paire de fibres, les autres paires de fibres pourront être utilisées à l'avenir pour accommoder plus de trafic.

3.1.3 Analyse de capacité

Une analyse comparative des solutions sans filtre et conventionnelle en termes de consommation de longueur d'onde a également été effectuée. L'étude a été réalisée avec l'hypothèse du plus court chemin pour le routage. L'attribution de longueur d'onde est effectuée à l'aide d'une métaheuristique basée sur la recherche taboue adaptée des travaux antérieurs (Archambault et al., 2010). Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.4, les résultats de la solution sans filtre sont donnés par la plateforme de conception FNDS adaptée pour les réseaux sous-marins. Pour la solution conventionnelle, deux scénarios différents de répartition du trafic ont été considérés. Dans le premier cas, les paires de fibres sont dédiées au transport du trafic entre des nœuds spécifiques. Ce cas correspond au cas réaliste où les 3 paires de fibres de la solution conventionnelle aient été utilisées par 3 opérateurs différents. Dans le deuxième cas (équilibre de charge), le trafic total est réparti uniformément sur les 3 paires de fibres. Les résultats de la solution conventionnelle sont obtenus par le logiciel *Optical Planner*TM.

Tableau 3.4 Nombre de transpondeurs et consommation en longueur d'onde des solutions conventionnelle et sans filtre pour le réseau *long haul*

Solution ⁽¹⁾	Distribution de trafic	Paire de fibres (PF)	Longueur moyenne des demandes (km)	Nombre de transpondeurs	Nombre de longueurs d'onde
Conventionnelle	Fibres Dédiées	noire	3612	58	16
		verte	7900	28	14
		Bleue	5423	52	24
		Total :		138	24
	Équilibre de charge	3 PF	5188	134	24
Sans filtre	Trafic total	1 PF	5184	134	67
		3 PFs	5184	134	23

⁽¹⁾ trafic total de 13.4 Tbit/s (espacement inter-canal = 50 GHz)

D'après les résultats, la solution sans filtre peut accommoder 13,4 Tbit/s de trafic avec un total de 67 longueurs d'onde sur une seule paire de fibres, par rapport à 24 longueurs d'onde pour la solution conventionnelle sur 3 paires de fibres. Au total, 134 transpondeurs sont utilisés à la fois dans la solution sans filtre et la solution conventionnelle avec équilibre de charge. Quelques transpondeurs supplémentaires (4 au total) sont nécessaires pour la solution conventionnelle avec des fibres dédiées en raison de l'effet d'arrondissement résultant de la distribution de la matrice de trafic total sur les 3 paires de fibre. Par rapport à la solution conventionnelle, le réseau sans filtre sur une paire de fibres est capable de réduire le coût final total de 44%, et le coût total de la ligne de 12%. Pour une comparaison équitable, les résultats pour une solution sans filtre sur 3 paires de fibres sont également présentés dans le Tableau 3.4. Dans ce cas, 23 longueurs d'onde sont nécessaires pour la solution sans filtre, qui est comparable au résultat obtenu pour la solution conventionnelle (24).

3.1.3.1 Limite de capacité

Afin d'estimer la capacité de la solution proposée à faire face à la croissance du trafic à long terme, les limites de la capacité des solutions sans filtre et conventionnelle ont été évaluées. Pour cette étude, la consommation de longueur d'onde a été calculée en fonction du niveau de trafic dans les 4 cas différents étudiés dans les sections précédentes qui sont la solution sans filtre sur 1 PF, la solution conventionnelle sur 3 PF (à la fois dédiée et équilibre de charge), et la solution sans filtre sur 3 PF. Le calcul de longueurs d'onde pour la solution sans filtre a été effectué sur plusieurs périodes (section 2.5.3) avec l'algorithme RWA adapté pour le cas sous-marin. Les résultats pour les solutions conventionnelles ont été obtenus avec l'outil *NetCalc Optical Planner*TM. La capacité limite d'une fibre a été fixée à 80 longueurs d'onde. Le coût des terminaux a été calculé à partir des données du coût des équipements (Ciena, 2013) à l'aide des tableaux sur Microsoft Excel® développé à cet effet. Les résultats sont présentés sur la Figure 3.3.

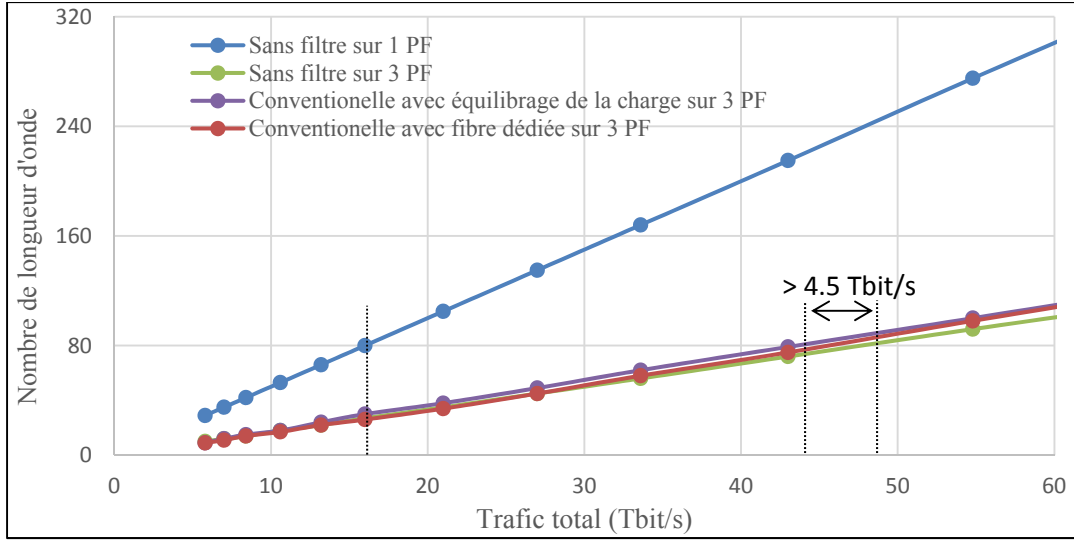


Figure 3.3 Les limites de la capacité des solutions sous-marines sans filtre et conventionnelle pour le réseau *long haul*

La limite de capacité est définie comme étant le niveau de trafic correspondant à un système de ligne optique à pleine charge (80 longueurs d'onde). La limite de capacité de la solution sans filtre sur 1 PF est de 16 Tbit/s par paire de fibres. Comme le montre la Figure 3.3, il est intéressant de noter que la limite de capacité de la solution sans filtre sur 3 PF (48 Tbit/s) est supérieure à la capacité de la solution conventionnelle de fibre dédiée sur 3 PF (43,5 Tbit/s).

3.1.3.2 Assignation du spectre

La consommation du spectre, ainsi que l'amélioration de l'utilisation du spectre, dans le cas élastique, a été estimée en fonction de l'évolution du trafic. L'amélioration de l'utilisation du spectre (*Spectrum Utilisation Improvement, SUI*) est définie comme :

$$SUI (\%) = 100 \times (\lambda^{fil} - \lambda_{elas}^{fil}) / \lambda^{fil} \quad (3.1)$$

où λ^{fil} est la consommation en nombre de FSU de la solution sans filtre avec grille fixe et λ_{elas}^{fil} est la consommation en nombre de FSU de la solution sans filtre élastique.

L'étude a été réalisée avec l'hypothèse du plus court chemin pour le routage. L'attribution de FSU a été faite en utilisant une métaheuristique basée sur les algorithmes génétiques adaptée

des travaux antérieurs (Zhenyu et al., 2015). Le nombre de FSU a été calculé selon les hypothèses du Tableau 2.1 en fonction du niveau de trafic pour la solution sans filtre avec grille fixe sur 1 PF et la solution sans filtre élastique sur 1 PF, et cela pour plusieurs périodes de trafic. Les résultats sont présentés sur la Figure 3.4, où la limite de capacité est définie comme étant le niveau de trafic correspondant à un système de ligne optique à pleine charge (320 FSU).

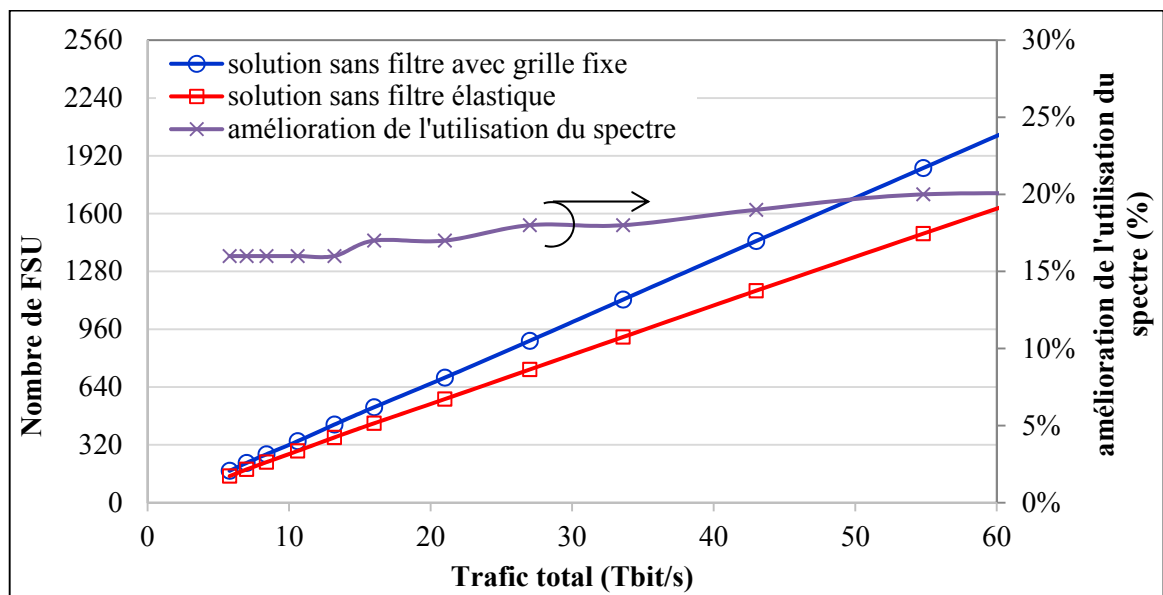


Figure 3.4 Différence d'évolution de la consommation en nombre de FSU pour les solutions sans filtre avec grille fixe et élastique du réseau *long haul*

La Figure 3.4 montre la consommation du spectre en fonction du trafic pour les deux solutions sans filtre élastique et avec grille fixe (axe principal de gauche). Le spectre consommé est exprimé en nombre d'unités de fréquence (FSU), où chaque FSU correspond à 12,5 GHz. Dans la solution avec grille fixe, la largeur du canal est de 50 GHz. Par conséquent, une demande de 500 Gbit/s consomme 250 GHz de spectre (5×50 GHz). D'autre part, la solution élastique a une largeur de canal de 37,5 GHz par canal avec le format de modulation DP-QPSK. Alors, une demande de 500 Gbit/s nécessite une bande passante totale de 200 GHz ($5 \times 37,5$ GHz + 12,5 GHz de bande de garde). La Figure 3.4 montre aussi l'amélioration de l'utilisation du spectre (axe secondaire à droite) de la solution sans filtre élastique par rapport à la solution sans filtre avec grille fixe en fonction du trafic. Les

résultats montrent que la solution sans filtre élastique présente une réduction significative de la consommation du spectre qui peut atteindre environ 20% avec une charge de trafic élevé, par rapport à la solution sans filtre avec une grille fixe. Ces résultats indiquent qu'une quantité importante du spectre est libérée dans un réseau sans filtre élastique, ce qui permet d'utiliser plus de canaux.

3.1.4 Evolution des coûts

Les coûts des terminaux des solutions sans filtre et conventionnelles pour diverses périodes de trafics ont également été estimés et sont présentés à la Figure 3.5. La Figure 3.5 montre la comparaison des coûts entre les solutions conventionnelles et sans filtre. D'après la Figure 3.5, le coût de la solution sans filtre est moins élevé que celui des solutions conventionnelles avec grille fixe si le trafic ne dépasse pas 30 Tbit/s.

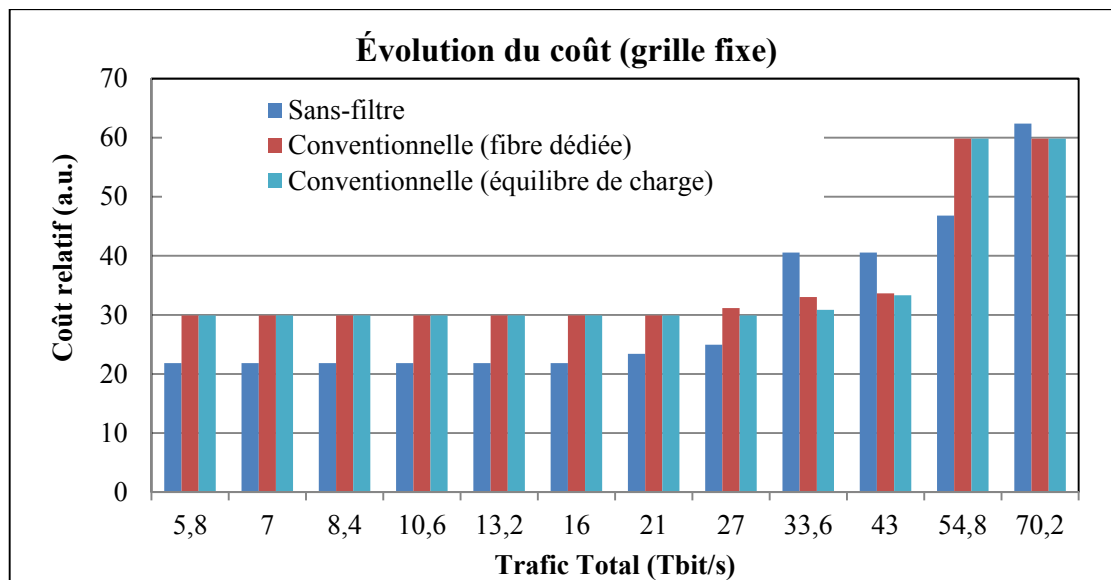


Figure 3.5 Comparaison des coûts des terminaux des solutions sans filtre et conventionnelle en fonction du trafic total pour le réseau *long haul*

Le coût est aussi économisé au niveau des terminaux dans la solution sans filtre par rapport aux solutions conventionnelles sous-marines élastiques (Figure 3.6). Notez que les composants d'un nœud terminal dans le réseau conventionnel élastique ont été supposés

avoir la fonctionnalité élastique. Le coût d'un WSS élastique (Frisken et al., 2011) est supposé être 1,5 fois le coût d'un WSS à grille fixe (Rambach et al., 2013). Toutefois, dans le réseau conventionnel élastique, un BU reconfigurable et sans grille, est nécessaire pour permettre une flexibilité complète. Ce coût n'a pas été inclus dans les graphiques des coûts, car les BU reconfigurables ne sont pas encore disponibles dans le commerce. L'inclusion de ce coût se traduirait par des coûts de système conventionnel élastique encore plus élevé.

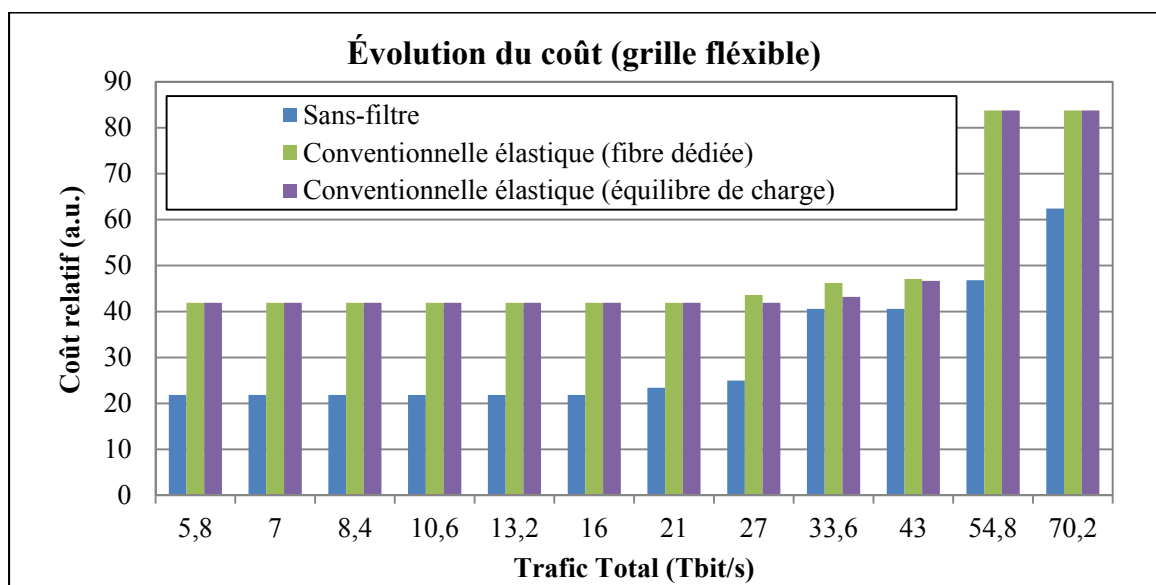


Figure 3.6 Comparaison des coûts des terminaux des solutions sans filtre et conventionnelle en fonction du trafic total pour le réseau *long haul*

3.2 Réseau sous-marin régional

Le Réseau de la Figure 3.7 comprend 15 stations terrestres équipées de SLTE, ainsi que d'un système de ligne optique de 18 000 km, composé de 3 paires de fibres (bleue, noire et verte, respectivement) et 10 unités de branchement pour le raccordement des stations terrestres au tronc principal. L'architecture d'une station terrestre conventionnelle est représentée dans l'encart de la station 10. Chaque station terrestre comprend des transpondeurs, des multiplexeurs, des ROADM basés sur des WSS, ainsi que des amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA) pour compenser la perte d'insertion du multiplexeur et du WSS.

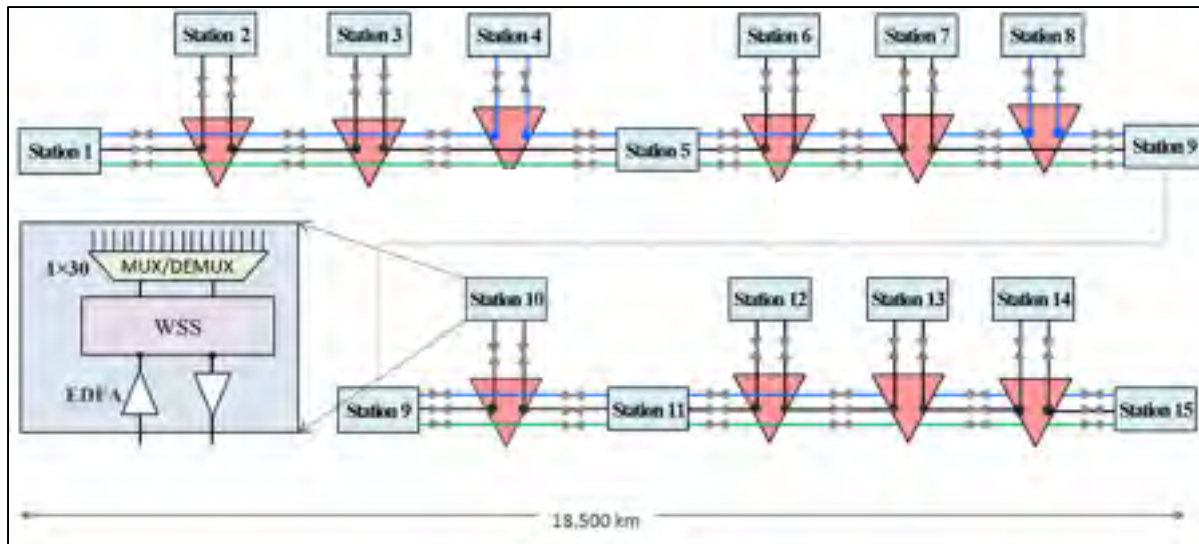


Figure 3.7 Architecture conventionnelle à trois paires de fibres (3 FP)
pour la topologie du réseau sous-marin *régional*
Tirée de Ciena (2013)

Dans cette architecture conventionnelle de la Figure 3.7, l'interconnexion de base entre les 15 nœuds est réalisée par la paire de fibres noire. La paire verte est un lien direct entre les nœuds terrestres 1 et 15. La paire bleue interconnecte un sous-ensemble de nœuds terrestres (1,4,5,8,9,11 et 15). Les deux paires supplémentaires (verte, bleue) sont utilisées pour transporter le trafic entre les nœuds spécifiques ainsi que pour fournir une protection contre les pannes via le transfert du trafic sur les paires de fibres alternatives.

Le Tableau 3.5 montre la matrice de trafic utilisée pour cette topologie. La matrice de trafic, exprimé en nombre de longueurs d'onde de 100 Gbit/s, est non uniforme et comprend un total de 420 demandes (42 Tbit/s) (Ciena, 2013).

Tableau 3.5 Trafic total entre les 15 stations (en nombre de longueurs d'onde de 100 Gbit/s)
 Total : 420 demandes (trafic total = 42 Tbit/s)
 Tiré de Ciena (2013)

nœud	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	1	2	5	5	2	2	4	8	5	6	3	3	1	5
2	1	0	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	5	2	1	0	2	2	1	2	3	3	3	2	1	2	2
5	5	2	1	2	0	2	1	3	4	3	2	1	2	1	3
6	2	1	1	2	2	0	2	2	2	1	1	1	1	1	1
7	2	1	1	1	1	2	0	2	2	2	2	1	1	1	1
8	4	1	1	2	3	2	2	0	3	2	2	1	1	1	2
9	8	1	1	3	4	2	2	3	0	5	4	2	2	1	3
10	5	1	1	3	3	1	2	2	5	0	5	2	2	1	3
11	6	1	1	3	2	1	2	2	4	5	0	3	3	2	3
12	3	1	1	2	1	1	1	1	2	2	3	0	2	1	2
13	3	1	1	1	2	1	1	1	2	2	3	2	0	1	2
14	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	0	1
15	5	1	1	2	3	1	1	2	3	3	3	2	2	1	0

3.2.1 Solution sans filtre proposée

La solution sans filtre proposée pour la topologie de réseau sous-marin illustrée à la Figure 3.7 est présentée à la Figure 3.8. Les résultats ont été obtenus par l'utilisation d'une version des outils de conception sans filtre adaptés selon les principes expliqués au chapitre précédent.

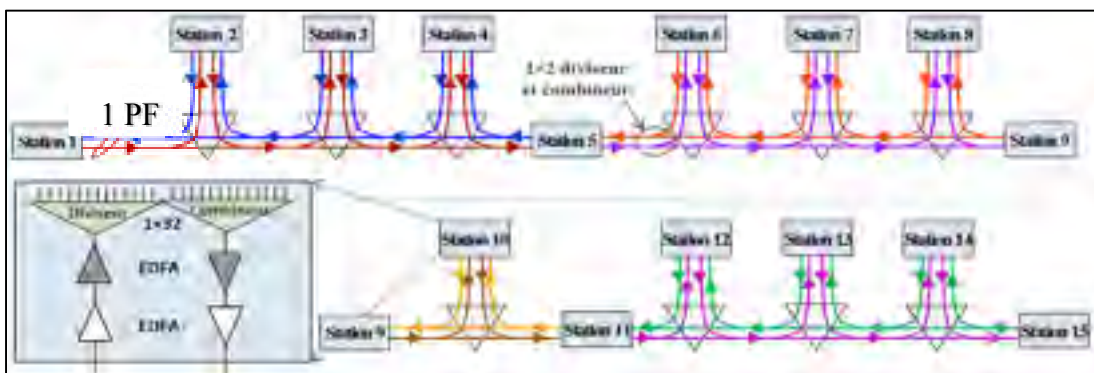


Figure 3.8 Solution sans filtre pour la topologie du réseau sous-marin *régional*

Huit arbres de fibre sont utilisés pour transporter le trafic entre les 15 stations d’atterrissement de câbles. Dans les terminaux, les multiplexeurs/démultiplexeurs et les WSS sont remplacés par des diviseurs/combineurs passifs 1×32. Deux EDFA supplémentaires sont utilisés pour compenser la perte d’insertion des coupleurs. Les 10 unités de branchement sont équipées de simples coupleurs 1×2 pour le raccordement des branches au tronc principal. La régénération des signaux est effectuée au niveau des stations 5, 9 et 11. La matrice de trafic dans ce cas est modifiée, comme expliquer à la section 2.5.2.

3.2.2 Analyse des coûts

Tableau 3.6 Coûts relatifs des équipements de terminal des solutions sans filtre et conventionnelle pour le réseau *régional* par rapport à un modem QPSK à 100 Gbit/s

Solution ⁽¹⁾	Distribution de trafic	Équipements de terminal	Quantité	Coût unitaire (a.u.) ⁽²⁾	Coût total (a.u.)
Conventionnel	Fibre dédiée	WSS	44	1,25	55
		MUX (1x30)	91	0,31	28,21
		Transpondeurs ⁽³⁾	24	1	24
		Coût total			107,21
	Équilibrage de la charge	WSS	44	1,25	55
		MUX (1x30)	88	0,31	27,28
		Coût total			82,28
Sans filtre 2 PF	Trafic total	Diviseurs passifs (1x32)	66	0,16	10,56
		Amplificateur	66	0,62	40,92
		Coût total			51,48
Sans filtre 3PF	Trafic total	Diviseurs passifs (1x32)	99	0,16	15,84
		Amplificateur	99	0,62	61,38
		Coût total			77,22

⁽¹⁾ trafic total de 42 Tbit/s (espacement inter-canal = 50 GHz pour DP-QPSK, 100 GHz pour DP-BPSK)

⁽²⁾ coûts unitaires normalisés au coût d’un modem QPSK à 100 Gbit/s (Ciena, 2013)

⁽³⁾ transpondeurs en plus à cause de l’effet d’arrondi dans la matrice de trafic

Une analyse comparative des coûts de la solution sous-marine sans filtre (Figure 3.8) et des coûts de la solution sous-marine conventionnelle (Figure 3.7) pour 42 Tbit/s de trafic est présentée dans cette section. La méthode de calcul des coûts a été appliquée selon le principe expliqué dans la partie 2.6. La solution conventionnelle du réseau sous-marin considérée dans cette étude (voir Figure 3.7) comprend des terminaux équipés de WSS qui effectuent un routage par longueur d'onde dans le domaine optique. On reprend les mêmes hypothèses de coûts pour les terminaux et les systèmes optiques de ligne de la topologie *long haul*, les résultats pour 42 Tbit/s de trafic sont répertoriés dans le Tableau 3.6 et le Tableau 3.7 respectivement (Ciena, 2013).

Tableau 3.7 Coûts relatifs des équipements de ligne des solutions sans filtre et conventionnelle pour le réseau régional
Tiré de Ciena (2013)

Solution	Distribution du trafic	L'équipement de ligne	Quantité	Coût par unité (a.u)	Coût total (a.u)
Conventionnel	fibre dédiée / équilibre de la charge	3 paires de fibres en km	21 350	1.0, 1.2, 2.5	22 257,5
		Amplificateurs 2 PF, 3 PF	358	60, 70, 80	24 610
		Coût total			46 867,5
Sans filtre 2PF	Trafic total	2 paires de fibres en km	18 500	0.9, 1.1, 2.3	17 151
		4 paires de fibres en km	2 850	1.1, 1.3, 2.8	3 557
		Amplificateurs 2 PF, 4 PF	313/45	60/80	22 380
		Coût total			43 088
Sans filtre 3PF	Trafic total	3 paires de fibres en km	18 500	1.0, 1.2, 2.5	19 023,5
		6 paires de fibres en km	2 850	1.2, 1.5, 3.2	3 948,5
		Amplificateurs 3 PF, 6 PF	313/45	70/90	25 960
		Coût total			48 932

Pour les deux solutions sans filtre et conventionnelle, le coût total du réseau a été évalué par le calcul des éléments supplémentaires dans les parties terrestres et submergées. Une comparaison des coûts montre une économie de 37 % de coûts dans l'équipement de terminal et une économie de 7 % dans l'équipement de ligne pour la solution sans filtre. Les économies de coûts dans les terminaux résultent de l'architecture de nœud passive des réseaux sans filtre. Le coût du système de ligne sans filtre a été évalué en supposant un câble de 2 paires de fibres.

3.2.3 Analyse de capacité

Une analyse comparative des solutions sans filtre et conventionnelle en termes de consommation de longueur d'onde a également été effectuée. L'étude a été réalisée avec l'hypothèse du plus court chemin pour le routage. L'attribution de longueur d'onde est effectuée à l'aide d'une métaheuristique basée sur la recherche taboue adaptée des travaux antérieurs (Archambault et al., 2010). Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.8, les résultats de la solution sans filtre sont donnés par la plateforme de conception FNDS. Pour la solution conventionnelle, deux scénarios différents de répartition du trafic ont été considérés. Dans le premier cas, les paires de fibres sont dédiées au transport du trafic entre des nœuds spécifiques. Ce cas correspond au cas réaliste où les 3 paires de fibres de la solution conventionnelle aient été utilisées par 3 opérateurs différents. Dans le deuxième cas (équilibre de charge), le trafic total est réparti uniformément sur les 3 paires de fibres. Les résultats de la solution conventionnelle sont obtenus par le logiciel *Optical Planner*TM.

D'après les résultats, la solution sans filtre peut accommoder 42 Tbit/s de trafic avec un total de 40 longueurs d'onde sur deux paires de fibres, par rapport à 43 longueurs d'onde pour la solution conventionnelle sur 3 paires de fibres. Au total, 530 transpondeurs sont utilisés à la fois dans la solution sans filtre et la solution conventionnelle avec équilibrage de charge. Quelques transpondeurs supplémentaires (24 au total) sont nécessaires pour la solution conventionnelle avec des fibres dédiées en raison de l'effet d'arrondissement résultant de la distribution de la matrice de trafic total sur les 3 paires de fibres ainsi que de la redistribution

de certaine demande sur les différentes fibres en raison de l'absence d'un chemin direct sur une seule fibre comme le chemin entre la station 2 et 4 de la Figure 3.7 . Par rapport à la solution conventionnelle, le réseau sans filtre avec 2 paires de fibres est capable de réduire le coût final total de 53 %, et le coût total de la ligne de 7 %. Pour une comparaison équitable, les résultats pour une solution sans filtre sur 3 paires de fibres sont également présentés dans le Tableau 3.8. Dans ce cas, 27 longueurs d'onde sont nécessaires pour la solution sans filtre, qui est largement meilleure que le résultat obtenu pour son homologue conventionnel. Mais les coûts de la ligne de la solution sans filtre sur 3 FP sont supérieurs à ceux de la solution conventionnelle.

Tableau 3.8 Nombre de transpondeurs et consommation en longueur d'onde des solutions conventionnelle et sans filtre pour le réseau régional

Solution⁽¹⁾	Distribution de trafic	Paire de fibres (PF)	Longueur moyenne des demandes (km)	Nombre de transpondeurs	Nombre de longueurs d'onde
Conventionnel	Fibre dédiée	Noire	2 866,55	304	43
		verte	4 619,79	96	20
		Bleue	3 214,18	148	27
		Total :		548	43
	Équilibrage de la charge	3 PF	3 985	530	40
Sans filtre	Trafic total	2 PF	3 185,9	530	40
		3 PF	3 185,9	530	27

⁽¹⁾ trafic total de 42 Tbit/s (espacement inter-canal = 50 GHz pour DP-QPSK, 100 GHz pour DP-BPSK)

3.2.3.1 Limite de capacité

Afin d'estimer la capacité de la solution proposée à faire face à la croissance du trafic à long terme, nous avons également évalué les limites de la capacité des solutions sans filtre et conventionnelle. Pour cette étude, la consommation de longueur d'onde a été calculée en fonction du niveau de trafic dans 5 cas différents: la solution sans filtre sur 2 PF, la solution sans filtre sur 3 PF, la solution conventionnelle sur 3 PF à la fois dédiée et avec équilibre de charge ainsi qu'une autre solution conventionnelle sur 3 PF où le trafic est redistribué sur les différents liens afin de réduire la consommation en longueur d'onde. Cette solution va servir pour une comparaison équitable, car dans le réseau conventionnel il y a toujours un lien qui se sature plus rapidement en utilisant le plus court chemin pour le routage des demandes. Ainsi, en redistribuant le trafic sur les différents liens il est possible de réduire un peu plus la consommation en longueur d'onde. Le calcul de longueurs d'onde pour la solution sans filtre a été effectué sur plusieurs périodes (section 2.5.3) avec l'algorithme RWA adapté pour le cas sous-marin. Les résultats pour les solutions conventionnelles ont été obtenus avec l'outil *NetCalc Optical Planner*TM. La capacité limite d'une fibre a été fixée à 80 longueurs d'onde. Le coût des terminaux a été calculé à partir des données du coût des équipements (Ciena, 2013) à l'aide des tableaux sur Microsoft Excel® développé à cet effet.

Les résultats sont présentés à la Figure 3.3, où la limite de capacité est définie comme étant le niveau de trafic correspondant à un système de ligne optique à pleine charge (80 longueurs d'onde). La limite de capacité de la solution sans filtre sur 2 PF est de 70 Tbit/s. Comme le montre la Figure 3.9, il est intéressant de noter que la limite de capacité de la solution sans filtre sur 3 PF (104 Tbit/s) est largement supérieure à la capacité de la solution conventionnelle avec fibre dédiée sur 3 PF (77 Tbit/s).

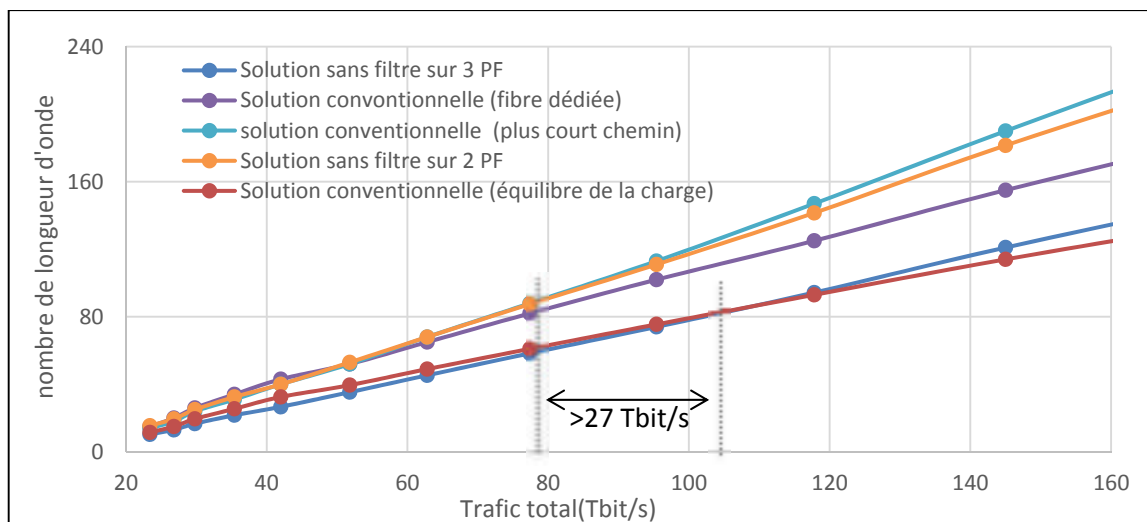


Figure 3.9 Les limites de la capacité des solutions sous-marines sans filtre et conventionnelle du réseau sous-marin régional

3.2.3.2 Assignment du spectre

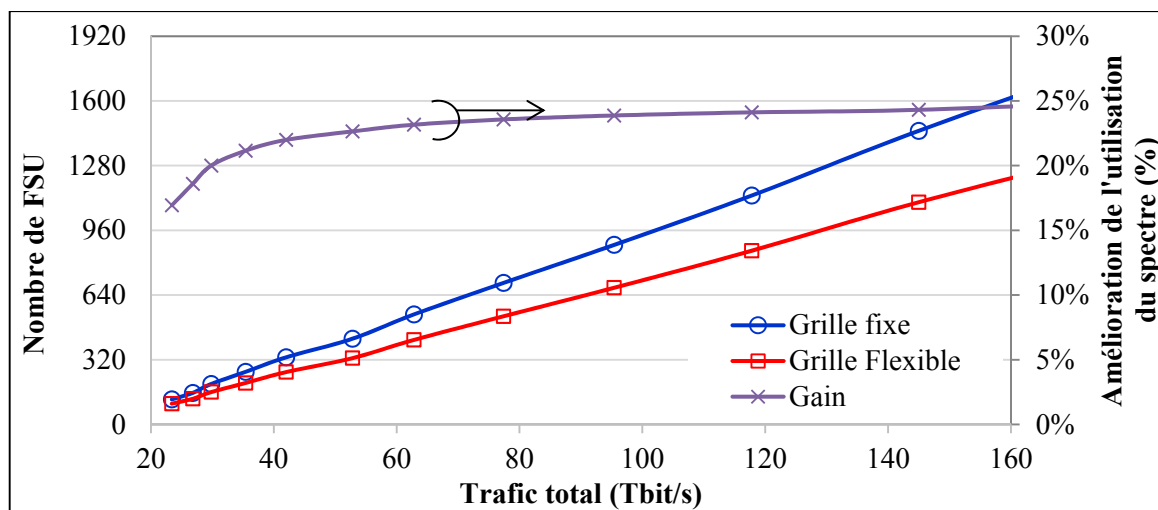


Figure 3.10 Différence d'évolution de la consommation en nombre de FSU pour une solution sans filtre avec et sans grille du réseau sous-marin régional

La consommation du spectre, ainsi que l'amélioration de l'utilisation du spectre, qui peut être réalisée sur les réseaux sans filtre par une approche élastique au lieu d'une approche avec grille fixe classique, a été estimée en fonction de l'évolution du trafic. L'étude a été réalisée

avec les mêmes hypothèses de la section 3.1.3.2. La consommation de FSU a été calculée en fonction du niveau de trafic pour la solution sans filtre sur 1 PF avec grille fixe et la solution sans filtre élastique sur 1 PF.

La Figure 3.10 montre la consommation du spectre en fonction du trafic pour les deux solutions sans filtre élastique et avec grille fixe (axe principal de gauche). Le spectre consommé est exprimé en nombre d'unités de fréquence (FSU), où chaque FSU correspond à 12,5 GHz. Dans la solution avec grille fixe, la largeur du canal est de 50 GHz pour un format de modulation DP-QPSK et 100 GHz pour DP-BPSK. La Figure 3.10 montre aussi l'amélioration de l'utilisation du spectre (axe secondaire à droite) de la solution sans filtre élastique par rapport à la solution sans filtre avec grille fixe en fonction du trafic. Les résultats montrent que la solution sans filtre élastique présente une réduction significative de la consommation du spectre qui peut atteindre environ 25% avec une charge de trafic élevé et 15% pour une charge de trafic moins élevée, par rapport à la solution sans filtre avec une grille fixe. Ces résultats indiquent qu'une quantité importante du spectre est libérée dans un réseau sans filtre élastique, ce qui permet d'augmenter l'efficacité du réseau.

3.2.4 Évolution des coûts

Les coûts des terminaux des solutions sans filtre et conventionnelles pour diverses périodes de trafics ont également été estimés et sont présentés à la Figure 3.11 et la Figure 3.12. Les résultats sont construits avec les mêmes hypothèses que pour le réseau *long haul*. La Figure 3.11 montre la comparaison des coûts entre les solutions conventionnelles et sans filtre avec grille fixe. Le coût des solutions conventionnelles élastiques est présenté à la Figure 3.12. Il est évident que nous économisons au niveau des terminaux dans la solution sans filtre élastique par rapport à la solution conventionnelle sous-marine élastique.

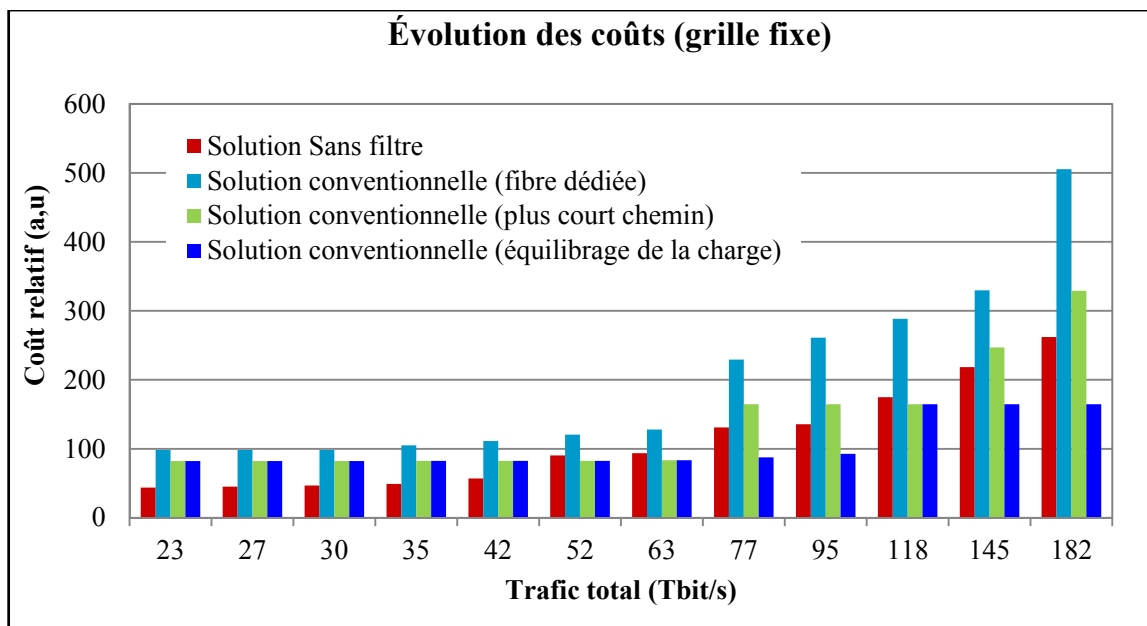


Figure 3.11 Comparaison des coûts des terminaux des solutions sans filtre et conventionnelles pour diverses périodes de trafics du réseau sous-marin régional

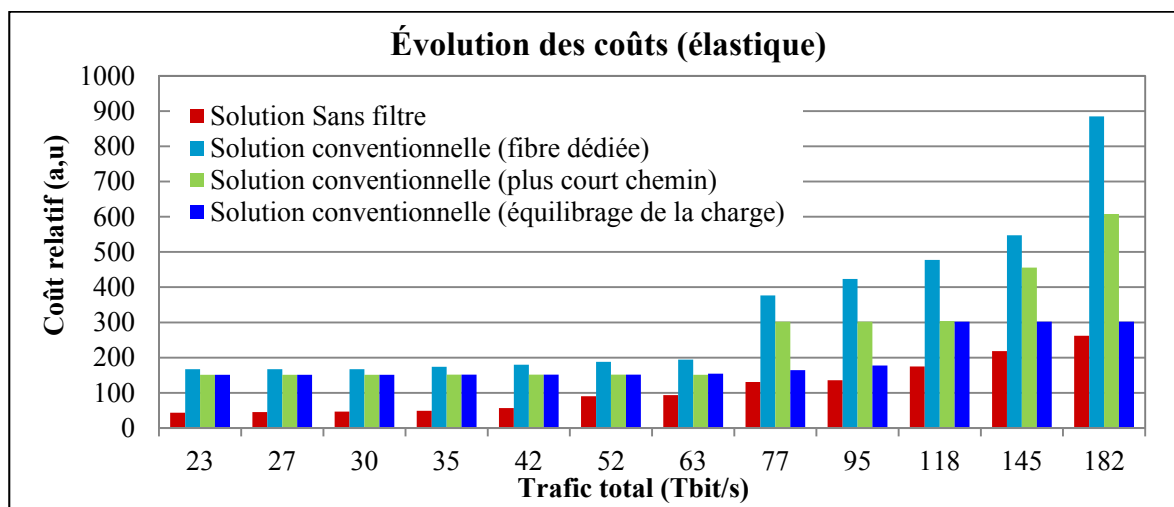


Figure 3.12 Comparaison des coûts des terminaux des solutions sans filtre et conventionnelles élastiques pour diverses périodes de trafic du réseau régional

À la Figure 3.11 et la Figure 3.12 sont présentés aussi les résultats de la solution conventionnelle avec le plus court chemin. La solution conventionnelle avec équilibre de la charge est une version optimisée de la solution avec le plus court chemin. La solution avec équilibre de la charge permet de réduire la congestion sur certains liens chargés, et par

conséquent de réduire la consommation de longueurs d'onde au détriment de la distance parcourue par une demande.

3.3 Réseau sous-marin en anneau

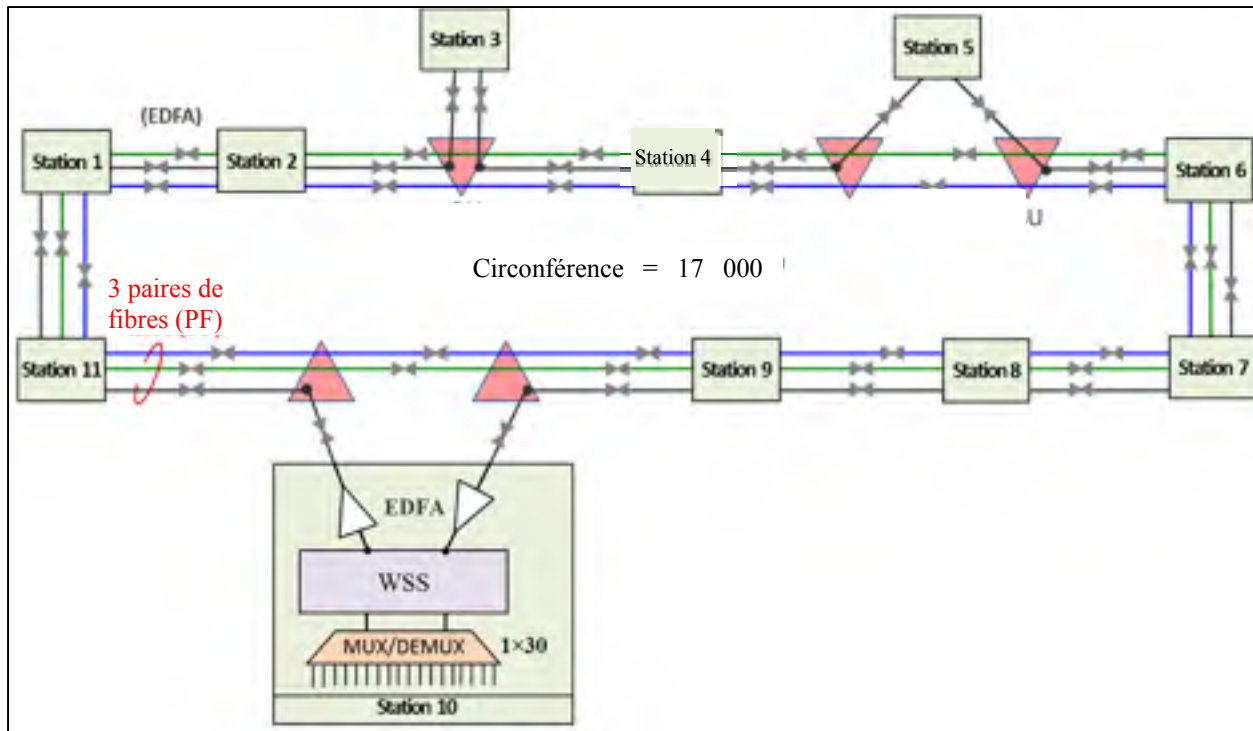


Figure 3.13 Architecture conventionnelle à trois paires de fibres (3 FP)
pour la topologie du réseau sous-marin *en anneau*
Tirée de (Ciena (2013))

Le Réseau de la Figure 3.13, avec une architecture sous-marine en anneau (Ciena, 2013) comprend 11 stations terrestres équipées de SLTE, ainsi que d'un système de ligne optique de 17 000 km, composé de 3 paires de fibres (bleu, noir et vert, respectivement) et 5 unités de branchement pour le raccordement des stations terrestres (3,5 et 10) au tronc principal. L'architecture d'un nœud conventionnelle est représentée dans l'encart de la dixième station.

Le Tableau 3.9 montre la matrice de trafic utilisée pour cette topologie. La matrice de trafic, exprimé en nombre de longueurs d'onde de 100 Gbit/s, est non uniforme et comprend un total de 478 demandes (trafic total = 47,8 Tbit/s).

Tableau 3.9 Trafic total entre les 11 stations pour la topologie du réseau sous-marin en anneau (en nombre de longueurs d'onde de 100 Gbit/s)
Tiré de Ciena (2013)

Nœud	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	4	5	9	7	6	7	2	5	6	6
2	4	0	2	4	2	2	3	2	3	2	2
3	5	2	0	5	4	4	4	2	4	4	2
4	9	4	5	0	9	4	8	3	4	4	3
5	7	2	4	9	0	3	5	2	4	6	2
6	6	2	4	4	3	0	9	4	5	5	3
7	7	3	4	8	5	9	0	3	7	8	4
8	2	2	2	3	2	4	3	0	4	5	3
9	5	3	4	4	4	5	7	4	0	7	4
10	6	2	4	4	6	5	8	5	7	0	3
11	6	2	2	3	2	3	4	3	4	3	0

3.3.1 Solution sans filtre proposée

Deux solutions sans filtre sont présentées pour le réseau sous-marin de la topologie en anneau (Ciena, 2013). La première solution sans filtre présentée dans la Figure 3.14 est constituée de deux paires de fibres. La Figure 3.14 (a) contient 4 arbres de fibre (bleu, rouge, vert et violet) délimitée par les stations 1 et 7 avec une longueur qui ne dépasse pas 9000 km pour chaque arbre. Cette paire de fibres transporte un trafic de 23,4 Tbit/s entre les 11 stations terrestres. Les stations 1 et 7 permettent de régénérer le signal. La deuxième paire de fibres à la Figure 3.14 (b) contient aussi 4 arbres de fibre (noir, orange, cyan et magenta) avec les stations 4 et 9 comme points de régénérations. Cette paire de fibres transporte un trafic de 24,4 Tbit/s entre les 11 stations terrestres.

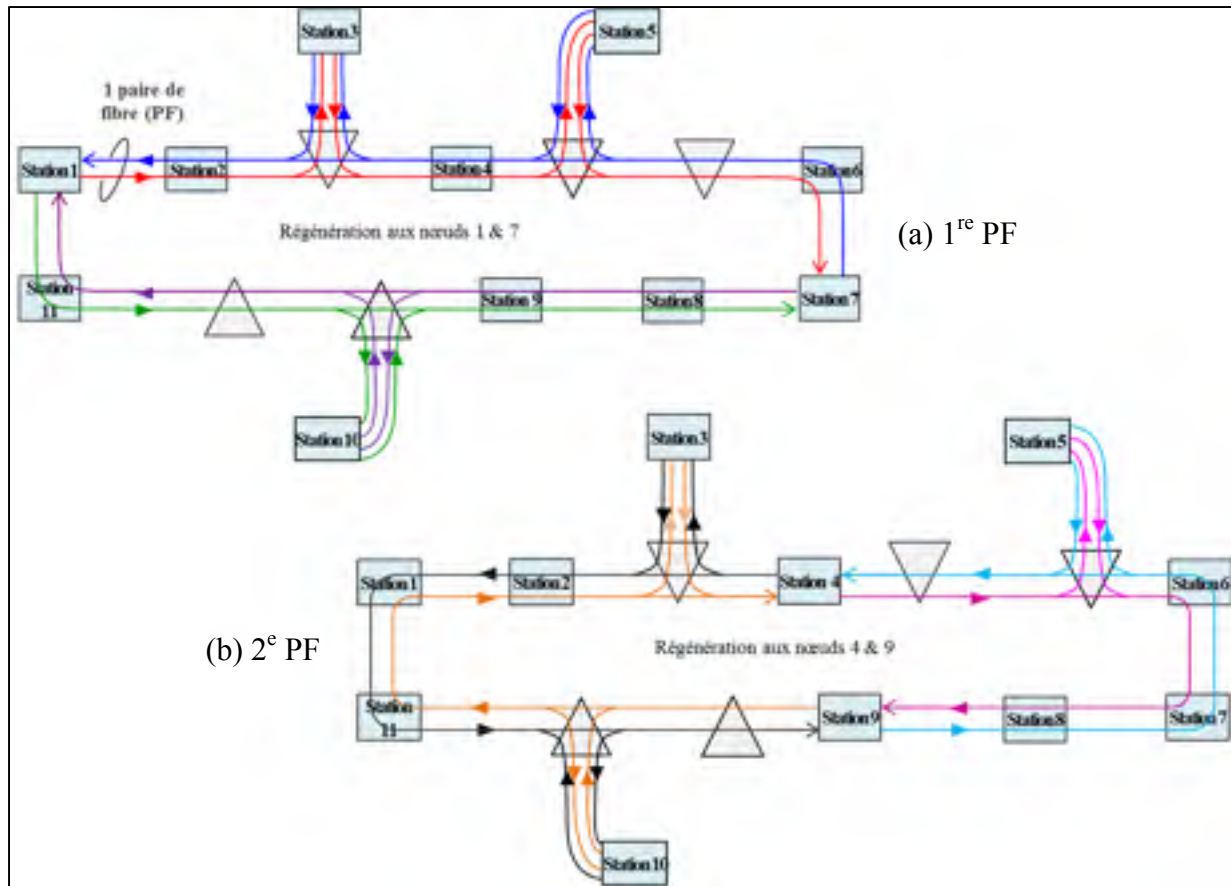


Figure 3.14 Solution sans filtre 1 pour la topologie du réseau sous-marin en anneau avec deux paires de fibres : (1^{re} PF) régénération au niveau des stations 1 et 7. (2^e PF) régénération au niveau des stations 4 et 9

Les demandes qui sont régénérées dans la solution de la Figure 3.14 sont les demandes qui sont acheminées des stations 5 et 6 vers les stations 10 et-11 ainsi que des stations 2 et 3 vers la station 8, ces demandes vont engendrer 40 transpondeurs de plus qu'une solution sans régénération. À noter aussi que les stations 5 et 10 sont reliées au tronc principal par deux chemins différents sur les deux paires de fibres, ce qui constitue une protection pour ces deux stations.

La deuxième solution sans filtre présentée dans la Figure 3.15 est constituée de deux paires de fibres. La Figure 3.15 (a) contient 2 arbres de fibre (bleu, rouge) avec une circonférence de 17 000 km pour chaque arbre. La première paire de fibres commence et se termine dans la première station. Cette paire de fibres va transporter un trafic de 23,4 Tbit/s entre les 11

stations terrestres. La deuxième paire de fibres sur la Figure 3.15 (b) contient aussi 2 arbres de fibre (vert et violet) avec une circonférence de 17 000 km pour chaque arbre qui commence et se termine dans la station 7. Cette paire de fibres va transporter un trafic de 24,4 Tbit/s entre les 11 stations terrestres.

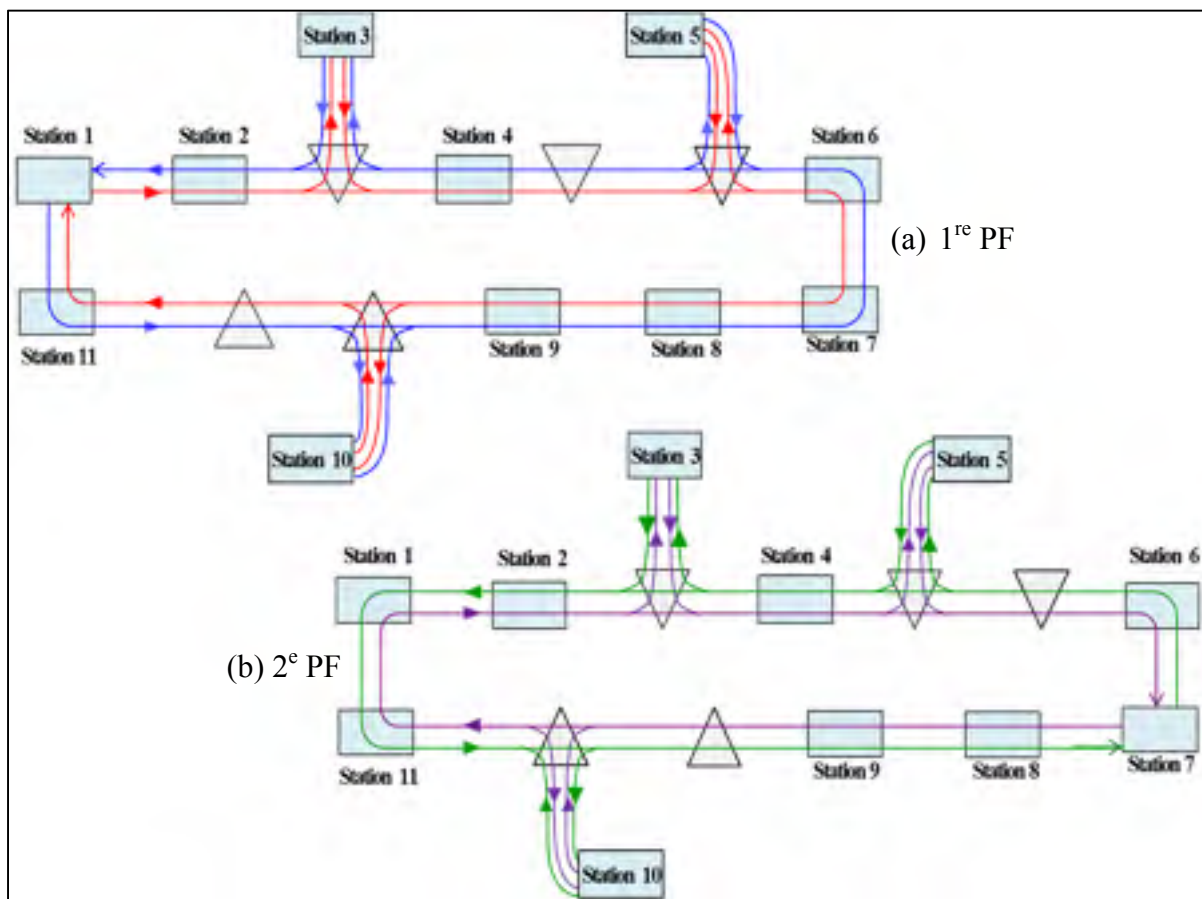


Figure 3.15 Solution sans filtre 2 pour la topologie du réseau sous-marin en anneau avec deux paires de fibres : (1^{re} PF) début de l'arbre à la 1^{re} station, (2^e PF) début de l'arbre à la station 7

Dans la solution sans filtre de la Figure 3.15, à cause de la consommation élevée de longueur d'onde, des bloqueurs de longueurs d'onde (WB) ont été placés sur chaque paire de fibres. Ainsi, sur la première paire de fibres (Figure 3.15 (a)), les bloqueurs de longueur d'onde sont placés au niveau des nœuds 4, 7 et 9. Sur la deuxième paire de fibres, les bloqueurs sont placés au niveau des nœuds 1, 4 et 9. Dans cette solution, aucune régénération n'est nécessaire, car les distances des différentes demandes ne dépassent pas 10 000 km.

3.3.2 Stratégie de distribution des demandes dans la topologie en anneau

Il s'est avéré que la matrice de trafic du réseau en anneau contient plus de demandes que les autres topologies. Cela impose de doubler le nombre de paires de fibre afin de satisfaire toutes les demandes. Ainsi, deux paires de fibres ont été considérées pour ce type de réseau depuis la première période de trafic. Vu que la distance entre le premier et le dernier nœud dépasse la portée maximale du signal, alors un algorithme qui permet de réduire le nombre de demandes à régénérer tout en équilibrant le trafic entre les deux matrices de trafic a été proposé.

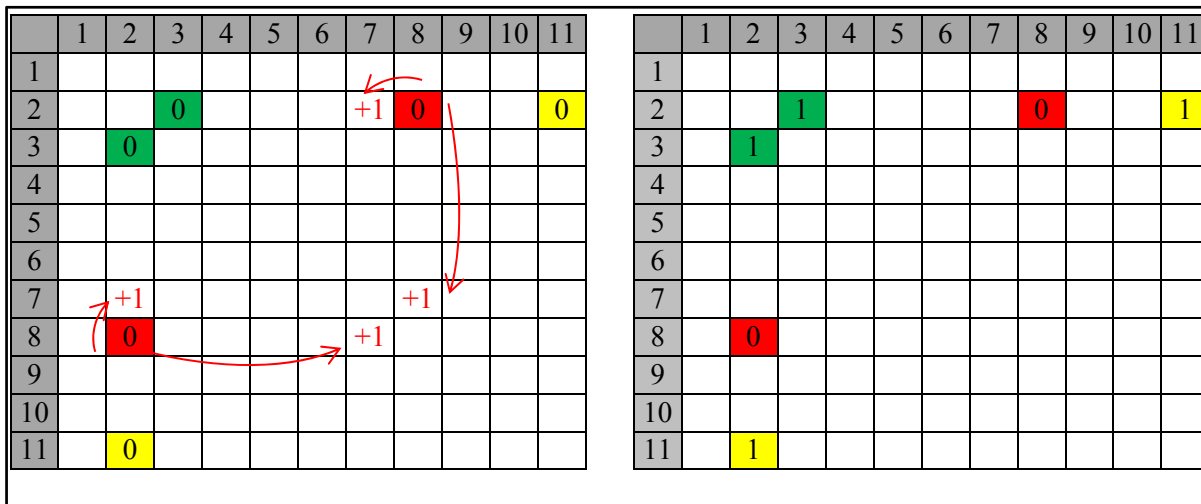


Figure 3.16 Exemple de distribution des demandes dans les matrices de trafic de la solution sans filtre 1 pour la topologie du réseau sous-marin en anneau (à gauche, matrice de trafic de la 1^{re} PF. À droite, matrice de trafic de la 2^e PF)

À la Figure 3.14, il est possible de réduire le nombre de demandes à régénérer en choisissant des stations de régénération différentes sur les deux paires de fibres. Ainsi, pour les demandes entre les stations 3 et 5, l'utilisation du chemin optique de la 1^{re} paire de fibres permet d'éviter la régénération contrairement à la 2^e paire de fibres de la Figure 3.14 qui nécessite le passage par un site de régénération. Pour réaliser cela, la distance entre chaque paire de nœuds doit être tenue en compte à partir de la matrice de distance de chaque solution. Un exemple de deux matrices de trafic unitaire simplifiées pour le réseau de la Figure 3.14 est présenté à la Figure 3.16.

Afin de distribuer le trafic sur les deux réseaux, il est nécessaire d'utiliser les matrices de distance qu'on obtient après l'application de l'algorithme de Dijkstra sur chaque paire de fibres. Après comparaison entre les deux matrices de distances, 3 types de demandes sont vérifiées :

- les demandes qui ont des distances différentes sur les deux matrices (exemple entre les nœuds 2 et 11);
- les demandes qui doivent être régénérées sur les deux matrices, en général ce sont les demandes avec une distance nulle sur les deux matrices de distances des deux paires de fibres (2 et 8);
- les demandes qui ont la même distance (2 et 3).

L'algorithme doit satisfaire deux contraintes qui sont l'utilisation du plus court chemin et l'utilisation du minimum de longueurs d'onde. Ainsi, l'algorithme commence par distribuer les demandes qui ont des distances différentes (couleur jaune) sur les deux matrices de trafic, la solution qui contient la distance minimale est choisie pour satisfaire cette demande à condition que la valeur choisie soit inférieure à la distance maximale avant régénération (12 000 km). Les demandes qui doivent être régénérées (couleur rouge) seront distribuées sur d'autres demandes, comme l'exemple de la section 2.5.2, tout en équilibrant la charge si deux chemins avec régénération sont possibles sur les deux paires de fibres. Les demandes avec la même distance (couleur verte) peuvent être satisfaites dans la première ou la deuxième paire de fibres, la distribution se fait en équilibrant les demandes entre les deux paires de fibres afin de limiter l'utilisation des longueurs d'onde.

3.3.3 Analyse des coûts

Une analyse comparative des coûts des solutions sous-marines sans filtre avec une solution conventionnelle pour 47,8 Tbit/s de trafic est présentée dans cette section. Les coûts pour les terminaux et les systèmes optiques de ligne sont répertoriés dans le Tableau 3.10 et le Tableau 3.11. On reprend les mêmes hypothèses de coût pour les terminaux et les systèmes

optiques de ligne des topologies précédentes avec un seul réseau conventionnel sur fibre dédiée et deux solutions sans filtre avec et sans régénération.

Tableau 3.10 Coûts relatifs des équipements de terminal des solutions sans filtre et conventionnelle pour le réseau en anneau par rapport à un modem QPSK à 100 Gbit/s
Tiré de Ciena (2013)

Solution ⁽¹⁾	Distribution de trafic	Équipements de terminal	Quantité	Coût unitaire (a.u.)⁽²⁾	Coût total (a.u.)
Conventionnel	Fibre dédiée (3 PF)	WSS	54	1,25	67,5
		MUX/DEMUX (1x30)	116	0,31	35,96
		Coût total			103,46
Sans filtre	Trafic total (2 PF)	Diviseurs/Combineurs (1x2)	18	0,02	0,36
		Diviseurs/Combineurs (1x32)	39	0,16	6,24
		Amplificateurs	39	0,62	24,18
		Coût total			30,78
	Trafic total (3 PF)	Diviseurs/Combineurs (1x2)	27	0,02	0,54
		Diviseurs/Combineurs (1x32)	59	0,16	9,44
		Amplificateurs	59	0,62	36,58
		Coût total			46,56

⁽¹⁾ trafic total de 47,8 Tbit/s (espacement inter-canal = 50 GHz pour DP-QPSK et 100 GHz pour DP-BPSK)

⁽²⁾ coûts unitaires normalisés au coût d'un modem QPSK à 100 Gbit/s (Ciena, 2013).

Pour les deux solutions sans filtre et conventionnelle, le coût total du réseau a été évalué par le calcul des éléments supplémentaires dans les parties terrestres et submergées. Les différences de coûts totaux peuvent être trouvées dans le Tableau 3.10 et le Tableau 3.11 respectivement. Une comparaison des coûts montre 70% d'économie de coûts dans l'équipement terminal et 11% dans l'équipement de ligne pour la solution sans filtre. Les économies de coûts dans les terminaux résultent de l'architecture de nœud passive des réseaux sans filtre. Le coût du système de ligne sans filtre a été évalué en supposant un câble de 2 paires de fibres. L'ajout des coûts des régénérateurs va pénaliser encore plus la solution conventionnelle, car elle comporte 8 stations de régénération par paire de fibres.

Tableau 3.11 Coûts relatifs des équipements de ligne des solutions sans filtre et conventionnelle pour le réseau en anneau
Tiré de Ciena (2013)

Solution	L'équipement de ligne	Quantité	Coût par unité (a.u)	Coût total (a.u.)
Conventionnelle	Câble 2 PF 3 PF	2 440 17 000	0.9, 1.1, 2.3 1, 1.2, 2.5	20 278,5
	Amplificateurs 2 PF, 3 PF	326	60, 70	22 430
	Coût total			42 708,5
Sans filtre 2PF	Câble 2 PF 4 PF	19 000 440	0.9, 1.1, 2.3 1.2, 1.5, 3.2	18 438
	Amplificateurs 2 PF/4 PF	326	60 / 80	19 500
	Coût total			37 938
Sans filtre 3PF	3 paires de fibres en km	19 440	1.0, 1.2, 2.5	19 990
	Amplificateurs 3 PF / 6 PF	326	70	21 789
	Coût total			41 779

3.3.4 Analyse de capacité

Une analyse comparative des solutions sans filtre et conventionnelles en termes de consommation de longueur d'onde a également été effectuée selon les hypothèses des topologies précédentes avec pour un seul réseau conventionnel sur fibre dédiée et deux solutions sans filtre avec et sans régénération.

Tableau 3.12 Nombre de transpondeurs et consommation en longueur d'onde des solutions conventionnelle et sans filtre pour le réseau en anneau

Solutions	Distribution de trafic	Paire de fibres (PF)	Longueur de demande moyenne (km)	Nombre de transpondeurs	Nombre de longueurs d'onde
Conventionnel	Fibre dédiée	noire	2122	208	43
		verte	1919	162	26
		bleue	2248	114	14
		Total	2059	484 (298) ⁽¹⁾	43
Sans filtre 1	Trafic total	2 PF	4400,31	474 (32) ⁽¹⁾	68
	Trafic total	3 PF	4400,31	474 (32) ⁽¹⁾	46
Sans filtre 2	Trafic total	2PF+12WB	4568,54	474 (12) ⁽²⁾	73
	Trafic total	3PF + 18WB	4568,54	474 (18) ⁽²⁾	51

⁽¹⁾ pour la solution conventionnelle et la solution sans filtre 1, le nombre entre parenthèses représente la quantité de transpondeurs nécessaires pour la régénération.

⁽²⁾ pour la solution sans filtre 2, le nombre entre parenthèses représente la quantité de bloqueurs de longueurs d'onde.

D'après les résultats du Tableau 3.12, la solution sans filtre peut accommoder 47.8 Tbit/s de trafic sur deux paires de fibres pour les 2 solutions sans filtre (37, 73 et 51 longueurs d'onde). La solution conventionnelle nécessite 43 longueurs d'onde sur 3 paires de fibres, ce qui est meilleur que les solutions sans filtre sur 3 paires de fibres (46 et 51). Un total de 474 transpondeurs sont utilisés pour la solution sans filtre2 sans régénération avec 6 bloqueurs de longueurs d'onde par paire de fibres, le nombre de transpondeurs est plus grand (40) pour la solution sans filtre1 avec 2 stations de régénération par paire de fibres. La solution conventionnelle aussi a un nombre élevé de régénérateurs, car elle comporte 8 stations de régénération par paire de fibres (292) en plus du nombre de transpondeurs (10) supplémentaires à cause de l'effet d'arrondi résultant de la distribution de la matrice de trafic total sur les 3 paires de fibres (noire, verte et bleue).

3.3.4.1 Limite de capacité

Afin d'estimer la capacité de la solution proposée à faire face à la croissance du trafic à long terme, nous avons également évalué les limites de la capacité des solutions sans filtre et conventionnelle. Pour cette étude, la consommation de longueur d'onde a été calculée en fonction du niveau de trafic pour les 3 cas étudiés dans les sections précédentes qui sont la solution sans filtre2 sur 3 PF avec des bloqueurs de longueurs d'onde, la solution conventionnelle sur 3 FP et la solution sans filtre1 sur 3 PF avec 2 stations de régénération par paire de fibres. Les résultats sont présentés à la Figure 3.17, où la limite de capacité est définie comme étant le niveau de trafic correspondant à un système de ligne optique à pleine charge (80 longueurs d'onde). Les résultats sont présentés sur la Figure 3.3.

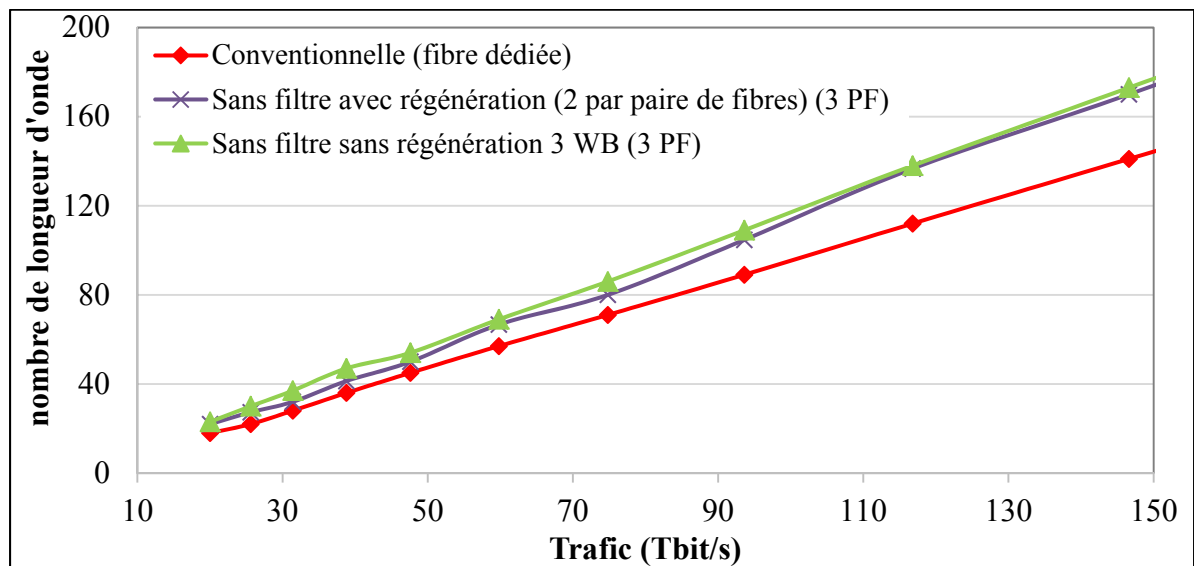


Figure 3.17 Les limites de capacité des solutions sous-marines sans filtre et conventionnelle pour la topologie du réseau sous-marin en anneau

Le calcul de longueurs d'onde pour la solution sans filtre a été effectué sur plusieurs périodes (section 2.5.3) avec l'algorithme RWA adapté pour le cas sous-marin. Les résultats pour les solutions conventionnelles ont été obtenus avec l'outil *NetCalc Optical Planner*TM. La capacité limite d'une fibre a été fixée à 80 longueurs d'onde. Le coût des terminaux a été

calculé à partir des données de coût des équipements (Ciena, 2013) à l'aide des tableaux sur Microsoft Excel® développé à cet effet.

Les résultats obtenus montrent que la solution conventionnelle peut accommoder plus de trafic que les solutions sans filtre (85 Tbit/s contre 70 Tbit/s). La différence de consommation s'explique par le fait que la solution conventionnelle renferme 8 régénérateurs par paire de fibres ce qui permet de réutiliser plus de longueurs d'onde par rapport à la solution sans filtre avec 2 stations de régénération par paire de fibres et la solution sans filtre avec 6 bloqueurs de longueurs d'onde par paire de fibres.

3.3.4.2 Assignation de spectre

La consommation du spectre, ainsi que l'amélioration de l'utilisation du spectre, qui peut être réalisée sur les réseaux sans filtre par une approche élastique au lieu d'une approche avec grille fixe classique, a été estimée en fonction de l'évolution du trafic. L'étude a été réalisée avec les mêmes hypothèses de la section 3.1.3.2. La consommation de FSU a été calculée en fonction du niveau de trafic pour la solution sans filtre sur 1 PF avec grille fixe et la solution sans filtre élastique sur 1 PF. Pour cette étude, la consommation de FSU a été calculée pour les deux solutions sans filtre 1 de la Figure 3.14 et sans filtre 2 de la Figure 3.15.

La Figure 3.18 montre la consommation du spectre en fonction du trafic pour les deux solutions sans filtre élastique et avec grille fixe (axe principal de gauche). Le spectre consommé est exprimé en nombre d'unités de fréquence (FSU), où chaque FSU correspond à 12,5 GHz. Dans la solution avec grille fixe, la largeur du canal est de 50 GHz pour un format de modulation DP-QPSK et 100 GHz pour le format DP-BPSK. La Figure 3.18 montre aussi l'amélioration de l'utilisation du spectre (axe secondaire à droite) de la solution sans filtre élastique par rapport à la solution sans filtre avec grille fixe en fonction du trafic. Les résultats montrent que la solution sans filtre élastique présente une réduction significative de la consommation du spectre qui peut atteindre environ 25 % avec une charge de trafic élevé et environ 22 % pour une charge de trafic moins élevée, par rapport à la solution sans filtre

avec une grille fixe. Ces résultats indiquent qu'une quantité importante du spectre est libérée dans un réseau sans filtre élastique, ce qui permet d'augmenter l'efficacité du réseau.

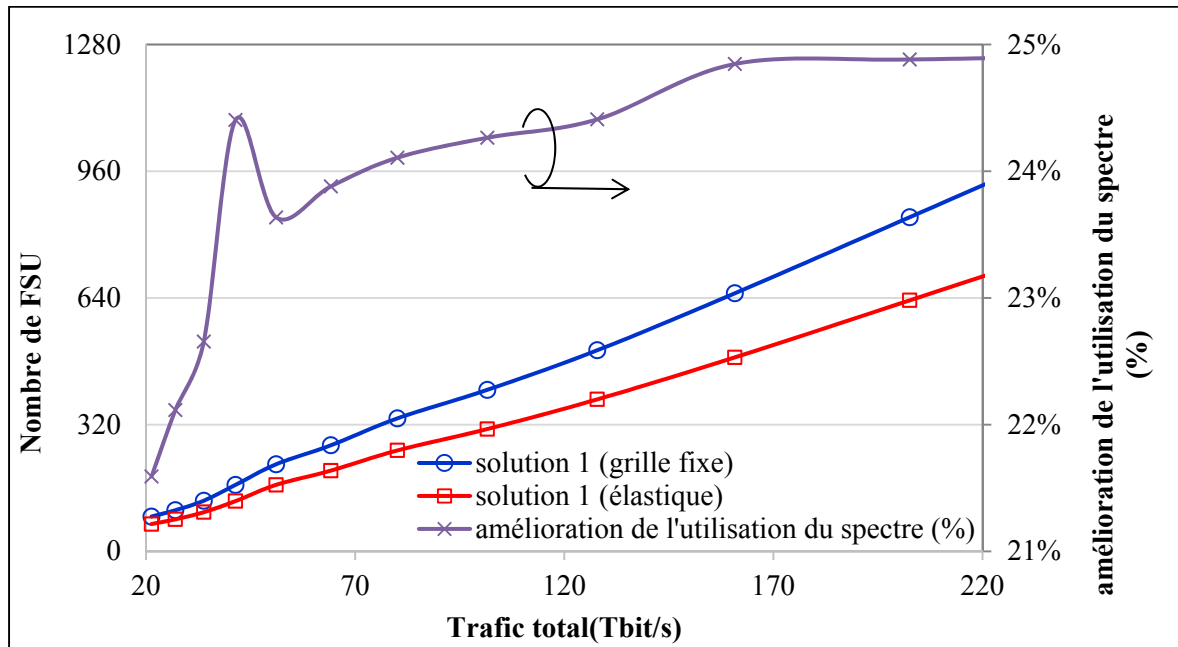


Figure 3.18 Différence d'évolution de la consommation en nombre de FSU pour la solution sans filtre 1 avec et sans grille pour la topologie du réseau sous-marin en anneau

La Figure 3.19 montre la consommation du spectre en fonction du trafic pour les deux solutions sans filtre élastique et avec grille fixe (axe principal de gauche). Dans la solution avec grille fixe, la largeur du canal est de 50 GHz pour le format DP-QPSK et 100 GHz pour le format DP-BPSK. La Figure 3.19 montre aussi l'amélioration de l'utilisation du spectre (axe secondaire à droite) de la solution sans filtre élastique par rapport à la solution sans filtre avec grille fixe en fonction du trafic. Les résultats montrent que la solution sans filtre élastique présente une réduction significative de la consommation du spectre qui peut atteindre environ 25 % avec une charge de trafic élevée et 15 % pour une charge de trafic moins élevée, par rapport à la solution sans filtre avec une grille fixe. Ces résultats indiquent qu'une quantité importante du spectre est libérée dans un réseau sans filtre élastique. À noter que pour cette solution on n'a pas utilisé les bloqueurs de longueurs d'onde, d'où le nombre élevé de FSU comparer aux résultats de la Figure 3.18.

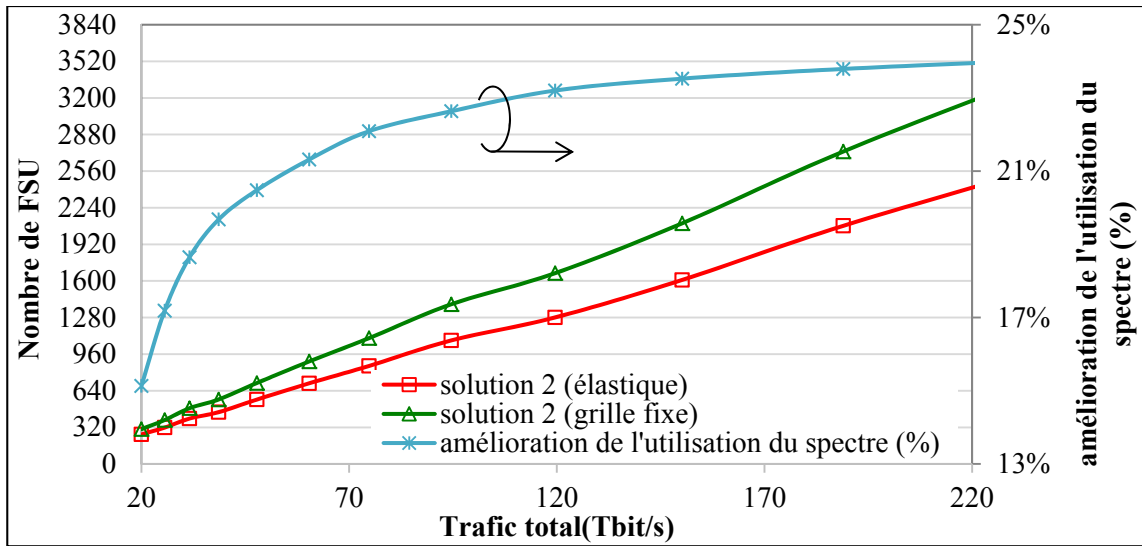


Figure 3.19 Différence d'évolution de la consommation en nombre de FSU pour la solution sans filtre 2 avec et sans grille pour la topologie du réseau sous-marin en anneau

3.3.5 Évolution des coûts

Les coûts des terminaux des solutions sans filtre et conventionnelles pour diverses périodes de trafic ont également été estimés et présentés à la Figure 3.20 et la Figure 3.21. Les résultats sont construits avec les mêmes hypothèses des topologies précédentes avec un seul réseau conventionnel sur fibre dédiée et deux solutions sans filtre avec et sans régénération. La Figure 3.20 montre la comparaison des coûts entre les solutions conventionnelles et sans filtre avec grille fixe. Les coûts de la solution conventionnelle élastique par rapport aux coûts des solutions sans filtre sont présentés dans la Figure 3.21. Dans le réseau en anneau, la quantité de transpondeurs nécessaire pour la régénération a été prise en considération à cause de la différence du nombre de stations de régénération entre les trois solutions mises à l'étude.

La consommation de longueurs d'onde dans le réseau en anneau est plus élevée dans les solutions sans filtre. Mais, à la Figure 3.20, on peut voir que le coût des solutions sans filtre avec grille fixe est moins élevé que la solution conventionnelle avec grille fixe si le trafic ne dépasse pas 40 Tbit/s et sans prendre en considération les transpondeurs nécessaires pour la régénération (histogramme opaque, Figure 3.20). Si on prend en considération les

régénérateurs dans le calcul des coûts (histogramme avec filtre transparent, Figure 3.20), dans ce cas, la solution conventionnelle est largement plus coûteuse que la solution sans filtre, car le nombre de transpondeurs requis pour la régénération (8 stations de régénération par paire de fibres) est élevé. Contrairement à la solution sans filtre 1 qui requiert 2 stations de régénération par paire de fibres et la solution sans filtre 2 avec uniquement des bloqueurs de longueurs d'onde.

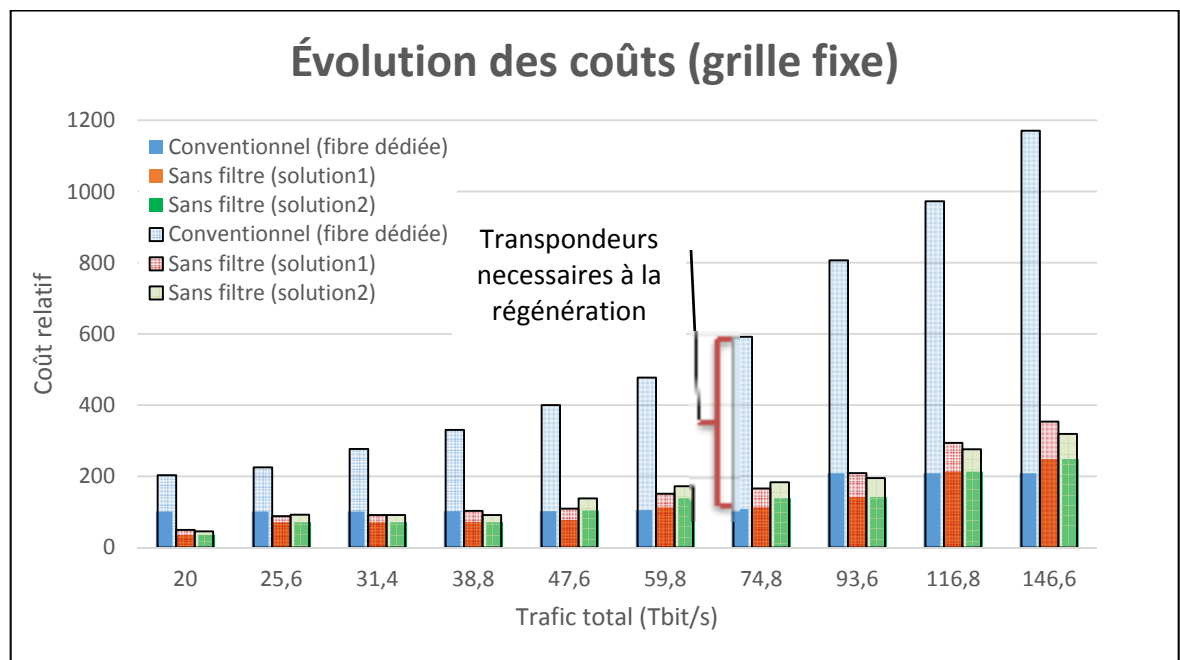


Figure 3.20 Comparaison des coûts des terminaux des solutions sans filtre et conventionnelle pour diverses périodes de trafics pour la topologie du réseau sous-marin en anneau

Dans le cas des réseaux élastiques (Figure 3.21), le coût au niveau des terminaux est toujours moins cher pour la solution sans filtre élastique par rapport à la solution conventionnelle sous-marine élastique avec ou sans stations de régénération.

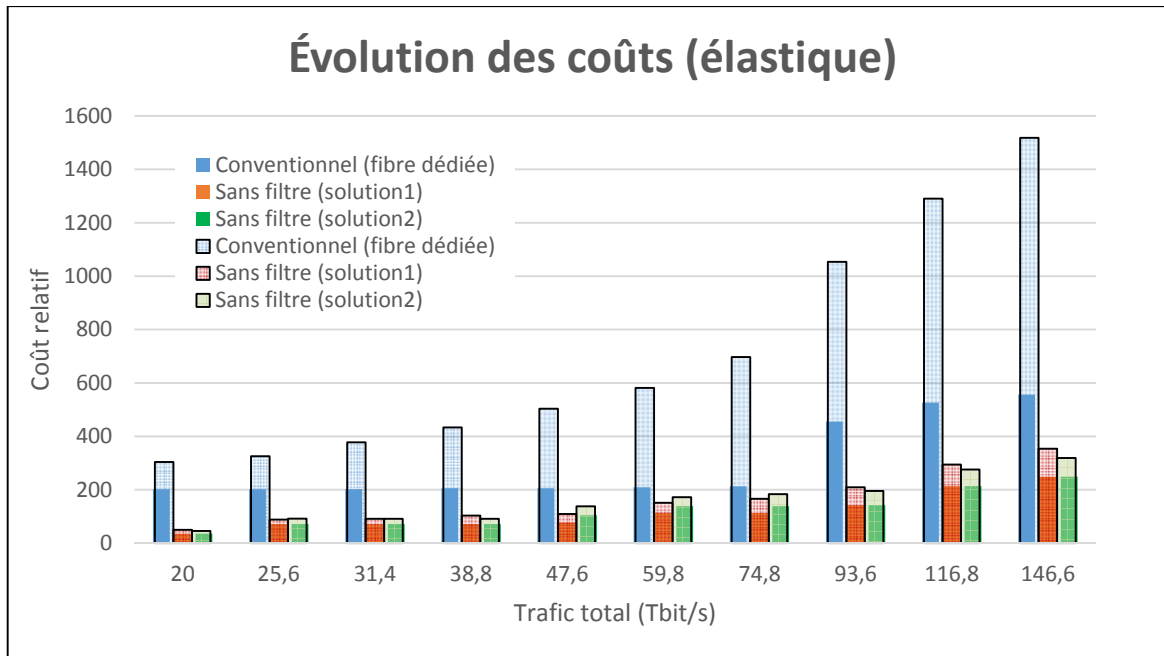


Figure 3.21 Comparaison des coûts des terminaux des solutions sans filtre et conventionnelle élastique pour diverses périodes de trafics pour la topologie du réseau sous-marin en anneau

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats des solutions conventionnelles et des solutions sans filtre ont été exposés pour chacune de trois topologies des réseaux sous-marins étudiés (*long haul*, régional et en anneau). La comparaison de la consommation de longueurs d'onde et des coûts pour plusieurs périodes de trafic montre que la solution sans filtre présente un avantage au niveau des coûts, surtout pour le passage vers une grille élastique qui se fait à un coût quasi nul comparé aux solutions conventionnelles. Les résultats montrent aussi que les solutions sans filtre élastiques réduisent la consommation du spectre de 15 % à 25 % ce qui permet d'augmenter l'efficacité du réseau.

CHAPITRE 4

Analyse de performance des réseaux sans filtre sous-marins sous un trafic dynamique

L'agilité est la capacité d'un réseau à se reconfigurer en fonction des variations de trafic. Actuellement, dans les réseaux terrestres, l'agilité est délivrée par des architectures nodales à commutation photonique basée sur des ROADMs. Par contre, dans les réseaux sous-marins conventionnels les ROADMs ne peuvent être déployés qu'aux nœuds terrestres. D'où la proposition d'une architecture sans filtre pour rendre les réseaux sous-marins flexibles et agiles.

Dans ce chapitre, l'agilité d'un réseau sans filtre est démontrée dans une situation de trafic dynamique où l'on observe des variations de demandes selon l'heure du jour et le décalage horaire entre les nœuds du réseau. Par la suite, une analyse de performance est réalisée pour les 3 topologies physiques dans laquelle on montre les économies possibles en termes de nombre de longueurs d'onde et de transpondeurs.

Mes contributions dans ce travail touchaient le développement des outils, l'établissement des algorithmes de calcul, la simulation et enfin l'analyse des résultats. Les principes exposés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une demande de brevet déposée le 18 décembre 2015.

4.1 Réseau sous-marin avec trafic dynamique et économie de ressources

Dans les réseaux, le niveau de trafic entre les paires de nœuds fluctue en fonction du temps (Internet2 Network NOC, 2015), ce qui ouvre la porte à une éventuelle exploitation de l'architecture (la capacité de reconfiguration) afin d'augmenter la flexibilité des réseaux sous-marins. Le réseau sous-marin ultra-longue-distance de la Figure 3.7, avec une longueur totale de 18 500 km, couvre une vaste zone géographique et plusieurs fuseaux horaires, avec un décalage horaire entre ses deux nœuds les plus éloignés qui peut atteindre 9 heures dans un cas typique. La Figure 4.1 illustre un exemple de variation journalière du trafic internet

dans un endroit donné; un nœud de réseau N10 atteint son plus haut niveau lorsque le niveau de trafic est à son plus bas niveau dans le nœud N5.

Un exemple de variation de trafic sur un réseau donné peut être vu sur la Figure 4.1 (Internet2 Network NOC, 2015). Dans cet exemple, le trafic entrant d'un lien sur le réseau est représenté sur une période de 24 heures. Dans le mode d'opération actuel d'un réseau, le nombre de longueurs d'onde serait fixé en fonction de la demande à l'heure de pointe, soit vers 15h00 de l'après-midi dans le cas illustré à la Figure 4.1.

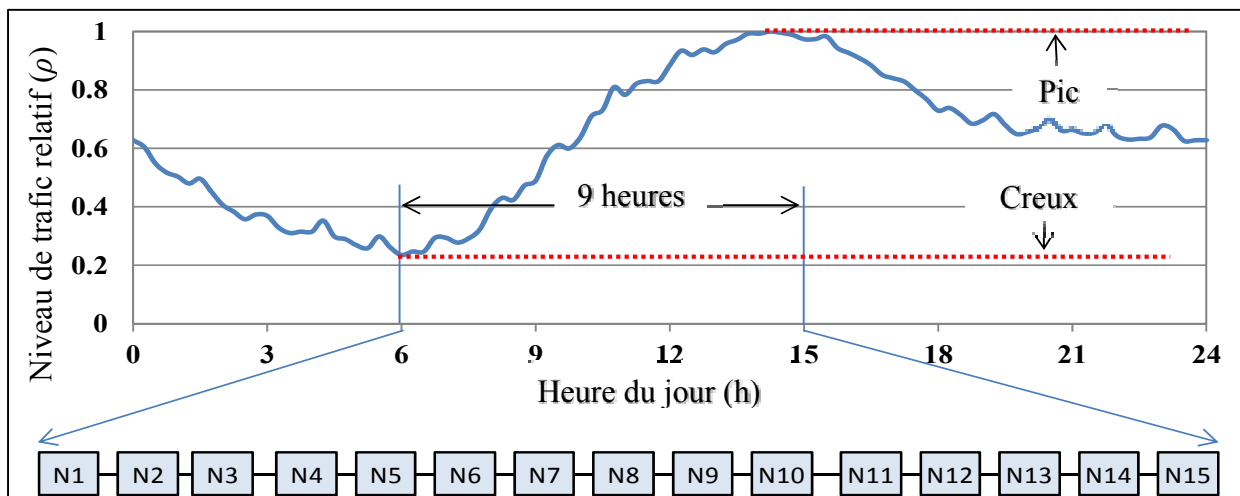


Figure 4.1 variation de trafic d'un réseau donné sur une période de 24 heures
Tirée de Internet2 Network NOC (2015)

Ainsi, dans un réseau sous-marin LH couvrant des milliers de kilomètres, le trafic à chaque nœud atteint généralement un pic et un creux de trafic à différents moments de la journée, comme indiqué à la Figure 4.1. Comme le montre la Figure 4.1, la courbe de variation journalière du trafic se déplace à travers tous les nœuds dans une même journée. Par conséquent, les transpondeurs utilisés à un nœud donné et les connexions optiques entre les nœuds ne sont pas requis tout le temps au cours de la journée. Cette variation représente une opportunité pour les opérateurs de réseau d'employer les ressources plus efficacement en les attribuant en fonction de la demande de trafic.

La Figure 4.2 (a) montre un exemple de la façon dont un transpondeur peut être économisé au nœud 1. Supposons que les nœuds 2 et 3 subissent le maximum de la charge de trafic à deux périodes différentes t_1 et t_2 , respectivement. On peut utiliser un transpondeur unique du nœud 1 vers les nœuds 2 et 3 à deux moments différents t_1 et t_2 respectivement, avec une seule longueur d'onde λ_1 , ce qui économise un transpondeur et une longueur d'onde. Il est possible aussi d'économiser une longueur d'onde sans économiser de transpondeur à l'exemple de la Figure 4.2 (b) lorsque la même longueur d'onde est partagée par deux demandes, à des temps différents, entre les nœuds (1,3) à t_1 et les nœuds (1,4) à t_2 . La réduction du nombre de longueurs d'onde, dans le cas de la Figure 4.2 (b), se fait par rapport à une solution sans filtre avec un trafic fixe. Sur cette base un algorithme d'agilité pour calculer le nombre de transpondeurs et de longueurs d'onde économisé dans les réseaux sous-marins sans filtre a été développé.

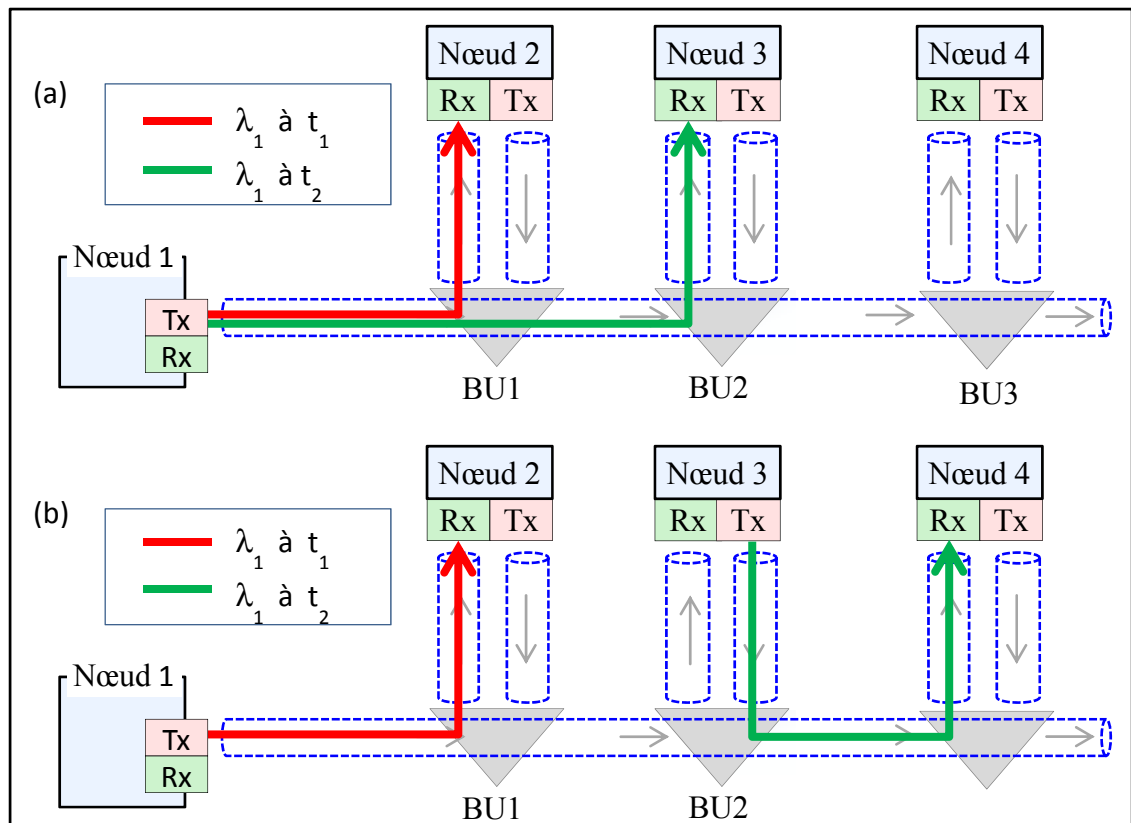


Figure 4.2 Exemple d'économie des ressources dans les réseaux sous-marins sans filtre (a) économie de transpondeurs et de longueurs d'onde (b) économie de longueurs d'onde uniquement

La Figure 4.3 (a) montre un exemple de la façon dont le nombre de transpondeurs est réduit au niveau du nœud 1 lorsque les demandes passent à travers le nœud terrestre 2 sans régénération. La Figure 4.3 (b) montre comment le nombre de transpondeurs est réduit lorsque les demandes sont régénérées au niveau du même nœud terrestre 2. Dans ce scénario, un transpondeur est économisé au nœud 1, et 3 transpondeurs sont économisés au nœud 2. De cet exemple, on voit que le nombre de transpondeurs économisé dans le cas d'une demande qui passe par une station de régénération sera plus élevé que le nombre de transpondeurs économisé dans le cas d'une demande qui ne passe pas par une station de régénération.

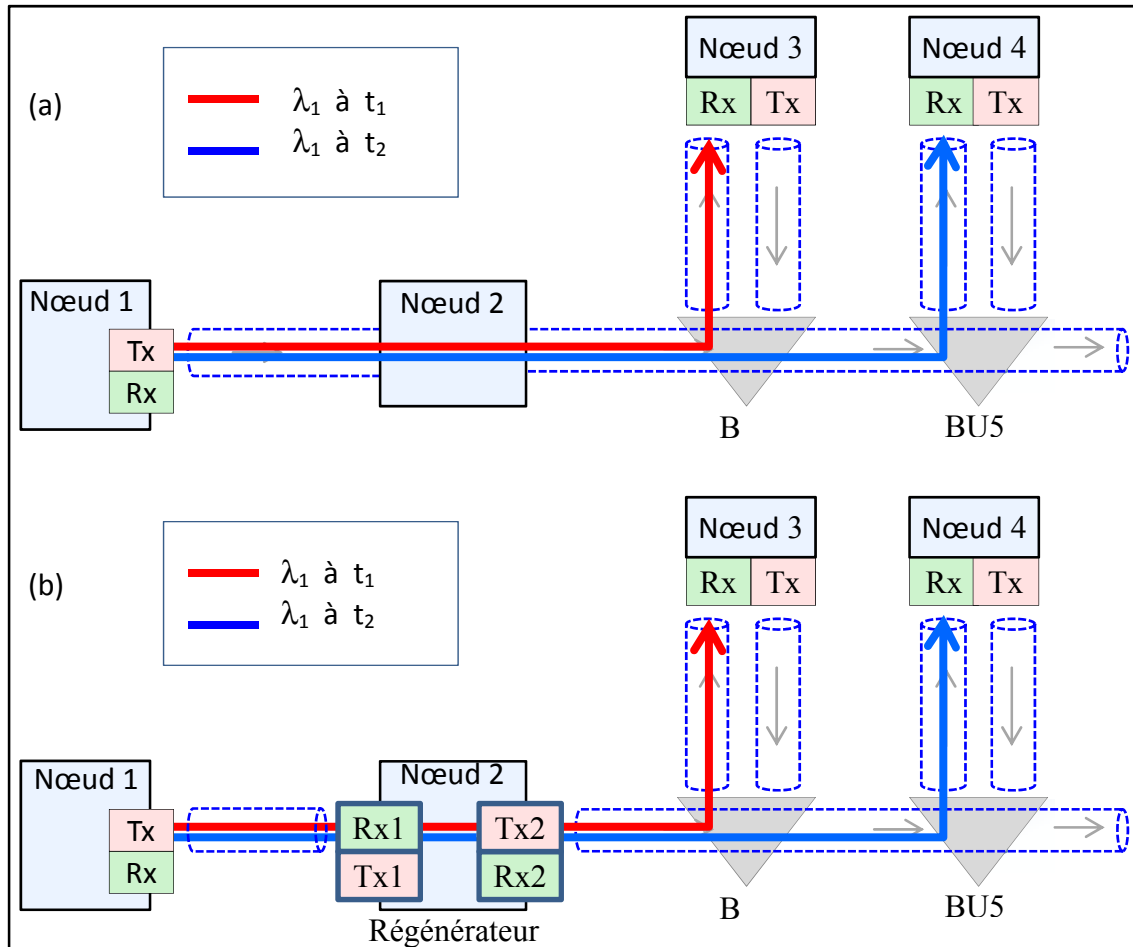


Figure 4.3 Exemple de réduction des ressources dans les réseaux sous-marins sans filtre
 (a) un transpondeur est économisé au nœud 1 lorsque les demandes passent par le nœud 2 sans régénération ; (b) trois transpondeurs sont économisés au niveau des nœuds 1 et 2 lorsque les demandes sont régénérées au nœud 5

4.2 Modèle et formulation mathématique de calcul du nombre de transpondeurs et le nombre de longueurs d'onde en mode dynamique

Le principe général est que le nombre requis de transpondeurs va varier dans un nœud donné lorsque le trafic journalier fluctue tel qu'illustré à la Figure 4.1. Soit un réseau à N nœuds reliés par fibres optiques bidirectionnelles formant une topologie tronc et branches arbitraires. Soit par ailleurs i ($1 \leq i \leq N$) et j ($1 \leq j \leq N$) les nœuds d'indices source et destination d'une connexion optique. Le modèle proposé comprend 3 étapes :

1. calcul des matrices de trafic instantanées;
2. calcul du nombre de transpondeurs;
3. calcul du nombre de longueurs d'onde.

4.2.1 Calcul des matrices de trafic instantanées.

La première étape est le calcul des matrices de trafic instantanées. La Figure 4.4 montre la méthode de calcul des matrices de trafic à partir de la variation de trafic journalier ρ .

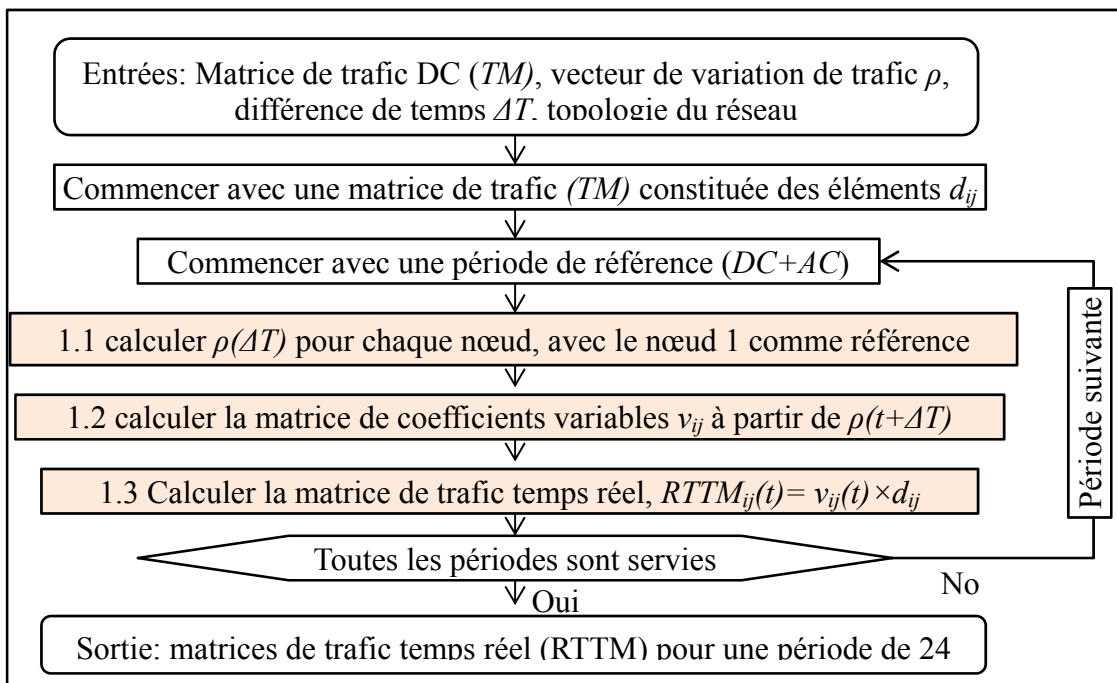


Figure 4.4 Algorithme pour générer les matrices de trafic temps réel

Deux paramètres de trafic ont été introduits : l'un est le trafic constant, appelé DC qui est tiré de la matrice de trafic TM (voir section 2.5.3), et l'autre est le trafic variable, noté AC . Si ΔT est la différence de temps (en heures) entre le nœud n et le nœud de référence 1, alors $\rho(t+\Delta T)$ est l'activité du trafic par rapport au nœud n à un instant t donné. ρ est un vecteur d'une seule ligne et le produit dyadique de ρ avec ρ donne le coefficient de trafic effectif $v_{ij}(t)$, l'équation de $v_{ij}(t)$ peut être écrite sous la forme:

$$v_{ij} = \rho \otimes \rho = \rho^T \rho \quad (4.1)$$

La matrice de trafic variable $v_{ij}(t)$ représente le niveau de trafic effectif entre les nœuds à un moment donné de la journée. Par exemple, lorsque l'heure au nœud 1 est 6 h alors l'heure du nœud 15 est $6 + 9 = 15 = 15$ h et le trafic au nœud 1 est inférieur au trafic au nœud 15. Par conséquent, le trafic effectif entre les deux nœuds sera obtenu en multipliant les deux coefficients $\rho(6+0) \times \rho(6+9)$. Sur la base de cet exemple, l'équation 4.1 peut être réécrite comme suit

$$v_{ij}(t) = \rho(t + \Delta T_i) \times \rho(t + \Delta T_j) \quad (4.2)$$

La matrice de trafic en temps réel peut être obtenue par la multiplication élément par élément des deux matrices $v_{ij}(t)$ et d_{ij} , qui peut être représentée par l'équation suivante:

$$RTTM_{ij}(t) = v_{ij}(t) \times d_{ij} \quad (4.3)$$

où $RTTM_{ij}(t)$ représente le trafic entre i et j au temps t . Dans cette étude, la variation du trafic est supposée discrète avec un échantillon estimé toutes les 15 minutes pendant 24 heures. Ce qui donne 96 matrices de trafic ($0 \leq t \leq 95$).

4.2.2 Calcul du nombre de transpondeurs

Le nombre total de transpondeurs optiques pour la solution conventionnelle et sans filtre fixe est égal à la somme des demandes de trafic entre chaque paire de nœuds. La matrice des

demandes est exprimée en nombre de canaux où le nombre des canaux était calculé à partir de la capacité d'un transpondeur (dans ce cas, 100 Gbit/s pour une modulation DP-QPSK). Le nombre total de transpondeurs est donné par l'équation suivante:

$$D = \sum TM_{ij} \quad (4.4)$$

Où TM_{ij} est la matrice de trafic exprimée en nombre de canaux.

Dans une solution sans filtre, grâce à la reconfiguration des connexions optiques, il est possible de réduire le nombre de transpondeurs par rapport à la solution conventionnelle et la solution sans filtre avec un trafic fixe. Les différentes étapes de calcul sont représentées à la Figure 4.5.

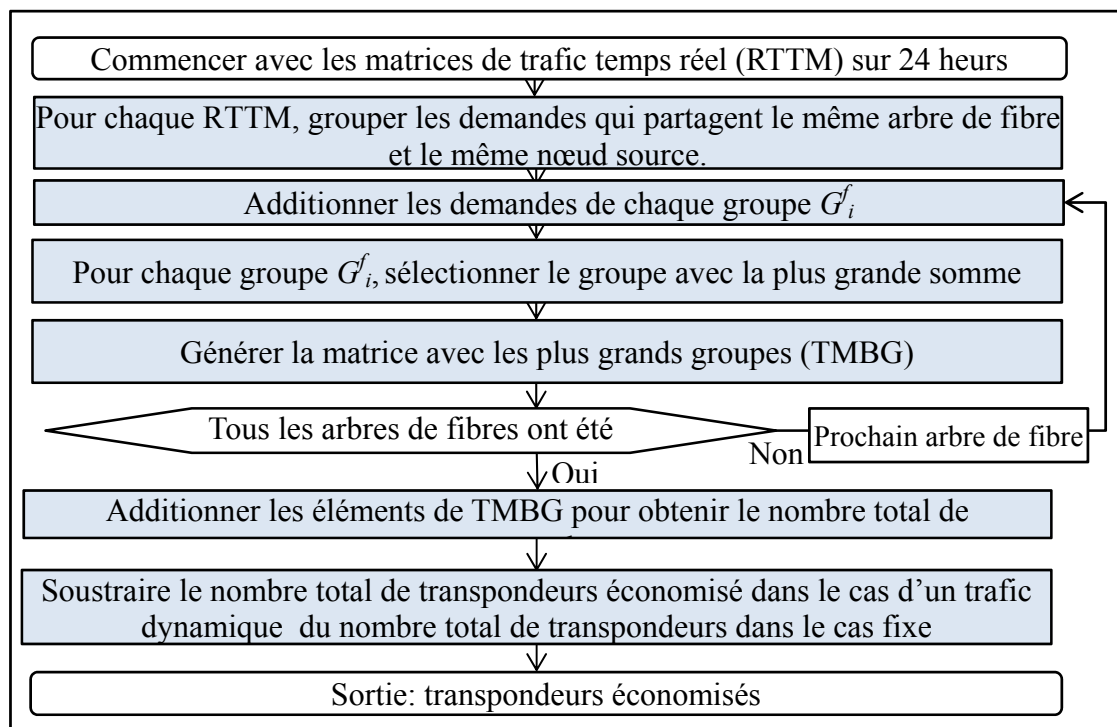


Figure 4.5 Algorithme pour le calcul du nombre de transpondeurs dans un scénario de trafic dynamique

Afin de calculer le nombre total de transpondeurs nécessaires dans une solution sans filtre, en prenant en considération la reconfiguration, il est nécessaire de regrouper les connexions

optiques appartenant au même arbre de fibre dans un même groupe G . Les connexions optiques qui partagent le même arbre de fibre et la même source (ou la même destination) peuvent partager le même transpondeur si leurs trafics ne se chevauchent pas dans le temps. Considérons une matrice unitaire de trafic du réseau LH (figure 3.2) avec 1 demande = 100 Gbit/s représentée dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 matrice de trafic unitaire du réseau LH avec les groupes de demandes

Nœuds	1	2	3	4	5	6	
1	0	1	1	1	1	1	1 ^{er} groupe du 1 ^{er} arbre de fibre G_1^1
2	1	0	1	1	1	1	
3	1	1	0	1	1	1	
4	1	1	1	0	1	1	4 ^e groupe du 2 ^e arbre fibre 2 G_4^2
5	1	1	1	1	0	1	
6	1	1	1	1	1	0	

Par la suite, une comparaison est faite entre tous les groupes formés dans les 96 matrices de trafic temps réel (*RTTM*). Ainsi, le 1^{er} groupe du 1^{er} arbre de fibre de la matrice au temps de référence $G_1^1(0)$ est comparé avec tous les groupes $G_1^1(t)$ pour $t < 96$. Le groupe avec la somme la plus élevée de demandes est retenu. La matrice formée par les plus grands groupes est appelée *TMBG*. Exemple. Si l'on considère un exemple avec deux périodes de trafic par jour seulement, la première période est représentée par la matrice de trafic unitaire du Tableau 4.1, et la deuxième période est représentée par une matrice uniforme de valeur 2 pour toutes les demandes. Dans ce cas le groupe retenu sera le groupe de la 2^e période de trafic, car la somme est plus élevée. La Figure 4.6 montre un exemple avec plusieurs périodes durant une journée. La formule pour calculer les plus grands groupes est comme suit :

$$G_i^f = \text{Max}_t \left[\sum_{j=i+1}^N \text{RTTM}_{ij}(t) \right] \text{ for } i < j \quad (4.5)$$

$$G_i^f = \text{Max}_t \left[\sum_{j=1}^{i-1} RTTM_{ij}(t) \right] \text{ for } i > j \quad (4.6)$$

où f est le nombre d'arbres de fibres, i représente le nœud source et j le nœud destination, t est défini entre $0 \leq t \leq 95$. À partir des équations (4.5) et (4.6) le nombre total de transpondeurs optiques peut être calculé comme suit:

$$T_{TR} = \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^N G_i^f \quad (4.7)$$

Où F représente le nombre total des arbres de fibre dans le réseau sans filtre.

La Figure 4.6 illustre un exemple pour économiser des transpondeurs.

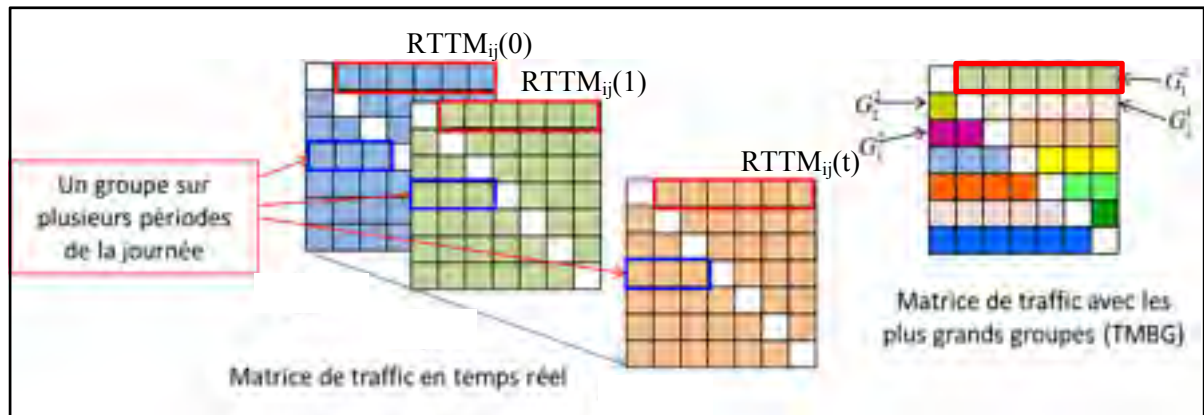


Figure 4.6 Création de la matrice de trafic avec les plus grands groupes (TMBG)

Sur la Figure 4.6, à gauche, les matrices de trafic en temps réel (RTTM). Pour chaque matrice $RTTM_{ij}$, les groupes G_i^f sont définis (équations 5 et 6). Chaque groupe est comparé aux groupes qui se trouvent à sa position sur les autres matrices de trafic $RTTM_{ij}$. Par la suite le groupe avec la plus grande somme est sélectionné pour constituer la matrice TMBG. Le nombre total de transpondeurs est calculé par l'équation 4.7. Le pourcentage de transpondeurs économisés est donné par l'équation 4.8

$$\%TR \text{ économisés} = 100 \times (D - T_{TR}) / D \quad (4.8)$$

où D est le nombre de longueurs d'onde nécessaires pour un scénario avec trafic fixe

4.2.3 Calcul du nombre de longueurs d'onde

Le nombre de longueurs d'onde requis pour un réseau sans filtre avec trafic fixe est calculé à partir de la matrice de trafic TM (section 2.5.3) selon le principe expliqué dans le chapitre 2 (2.4.2.2). Dans la présente section, la matrice de trafic en temps réel est utilisée afin de calculer le nombre total de longueurs d'onde dans un trafic dynamique. Les étapes sont illustrées sur la Figure 4.7.

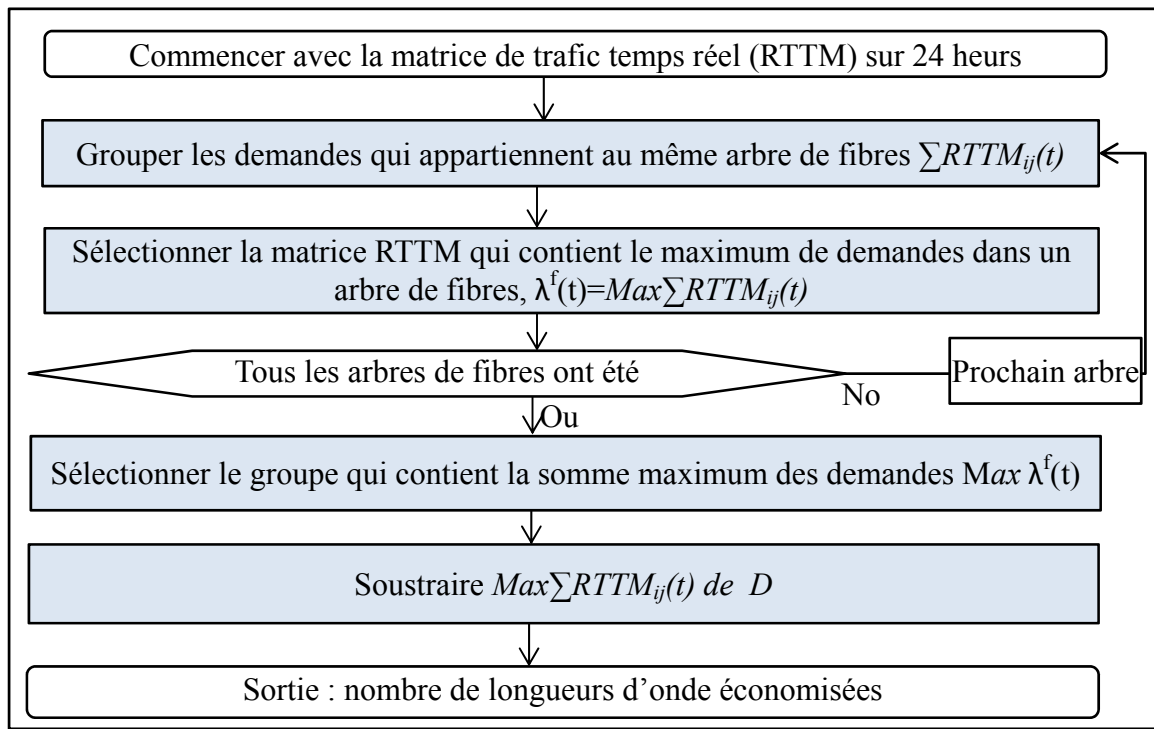


Figure 4.7 Algorithme pour le calcul du nombre de longueurs d'onde dans un scénario de trafic dynamique

Le nombre maximum de longueurs d'onde nécessaires sur 24 heures peut être calculé en prenant les valeurs maximales de la somme de tous les éléments de chaque matrice de trafic en temps réel, et cela pour chaque arbre de fibre comme suit:

$$\lambda^f = \text{Max}_t \left[\sum_i \sum_j RTTM_{ij}(t) \right] \quad i > j \quad (4.9)$$

Où λ^f représente le nombre maximum de longueurs d'onde nécessaires au cours de 24 heures sur un arbre de fibres f par rapport à l'ensemble des arbres de fibres. L'économie de longueur d'onde peut être calculée comme suit:

$$\% \lambda \text{ économisé} = 100 \times (D - \lambda^f) / D \quad (4.10)$$

où D est le nombre de longueurs d'onde nécessaires pour un scénario avec trafic fixe.

4.3 Résultats et analyses

4.3.1 Scénarios de variation de trafic

La Figure 4.8 montre cinq scénarios différents de variation du trafic par jour, où la variation de trafic la plus élevée a été supposée de 0 à 100%. Cependant, dans le monde réel, on trouve une variation plus réaliste de 30% à 100% ($x = 1,4$), comme indiqué dans (Internet2 Network NOC, 2015). Pour l'application de l'algorithme à un large éventail de réseaux et de variations de trafic, plusieurs coefficients AC ont été considérés. Le coefficient AC dépend de la valeur de x selon la formule suivante :

$$\rho_x = 1 - [(1 - \rho_1) / x] \quad (4.11)$$

où ρ_1 représente la variation de 0% à 100%. La variable x peut prendre toutes les valeurs réelles supérieure ou égale à la valeur 1. La variable x permet d'augmenter ou de diminuer la variation de trafic. Ainsi, la variation est maximale pour $x = 1$.

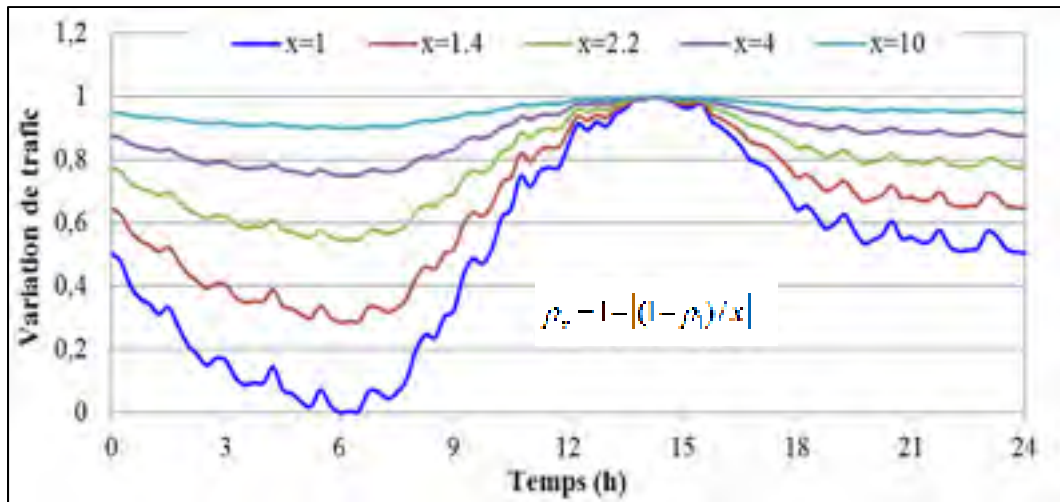


Figure 4.8 Scénarios de variation de trafic d'un réseau donné sur une période de 24 heures avec 5 variations différentes Internet2 Network NOC (2015)

4.3.2 Résultats en termes d'économies de transpondeurs et de longueurs d'onde dans un trafic dynamique

Dans ce chapitre, les résultats des économies de transpondeurs et de longueurs d'onde pour un trafic dynamique sont présentés pour les topologies physiques sans filtre des trois réseaux sous-marins (*long haul*, régional et en anneau) présentés au chapitre 3. Pour chaque réseau, une analyse du nombre de transpondeurs et de la capacité ont été effectuées pour plusieurs périodes de trafic. Les analyses sont présentées pour les deux cas à l'étude (avec trafic fixe et avec trafic dynamique). Cinq variations différentes de trafic ($x = 1, 1.4, 2.2, 4$ et 10) ont été comparées à un trafic fixe. A noter que les économies en transpondeurs sont par rapport aux réseaux sans filtre et conventionnel avec un trafic fixe. Par contre les économies de longueurs d'onde sont par rapport au réseau sans filtre avec un trafic fixe uniquement.

4.3.2.1 Réseau sous-marin *long haul*

Dans la Figure 4.9 et Figure 4.10, les économies de transpondeurs (à la fois en nombre et en pourcentage) sont présentées pour les différentes variations de trafic quotidiennes présentées à la Figure 4.8. Selon (Internet2 Network NOC, 2015), la variation de trafic la plus proche d'un trafic réel est représentée par $x = 1.4$ et $x = 2.2$. Ces graphiques montrent qu'un nombre

important de transpondeurs peut être économisé par la reconfiguration d'un réseau sans filtre en fonction des variations quotidiennes du trafic. La Figure 4.9 compare le nombre maximum de transpondeurs nécessaires pour les deux cas en étude (avec et sans variations de trafic). De la Figure 4.10, on peut voir que 5 % à 19 % des transpondeurs peuvent être économisés lorsque x varie entre 1,4 et 2,2.

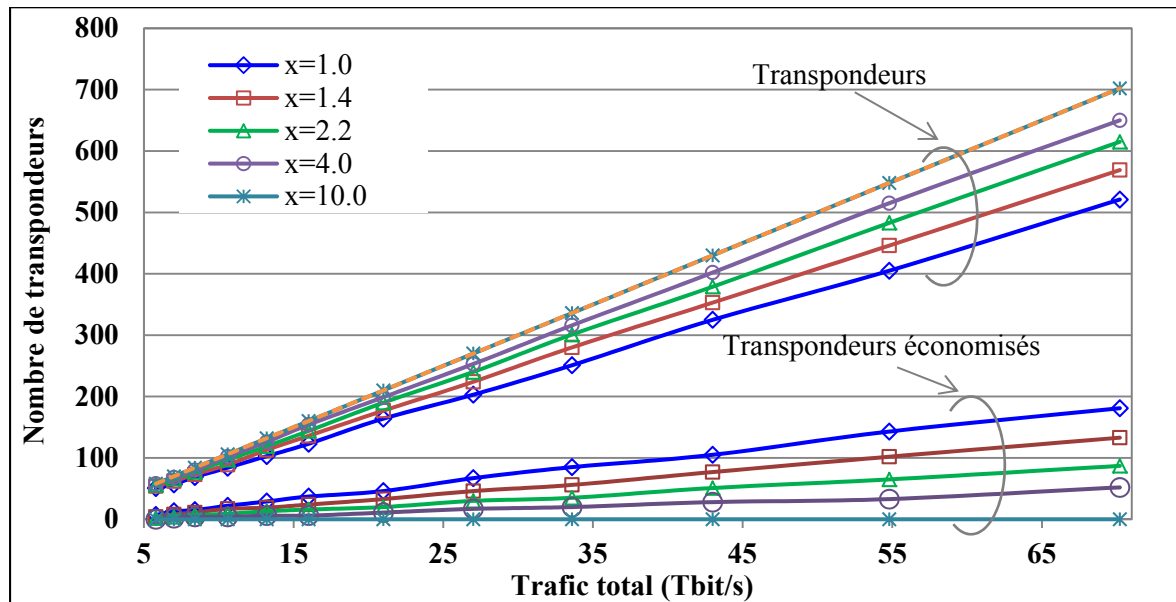


Figure 4.9 Nombre de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre du réseau *LH* en fonction du trafic

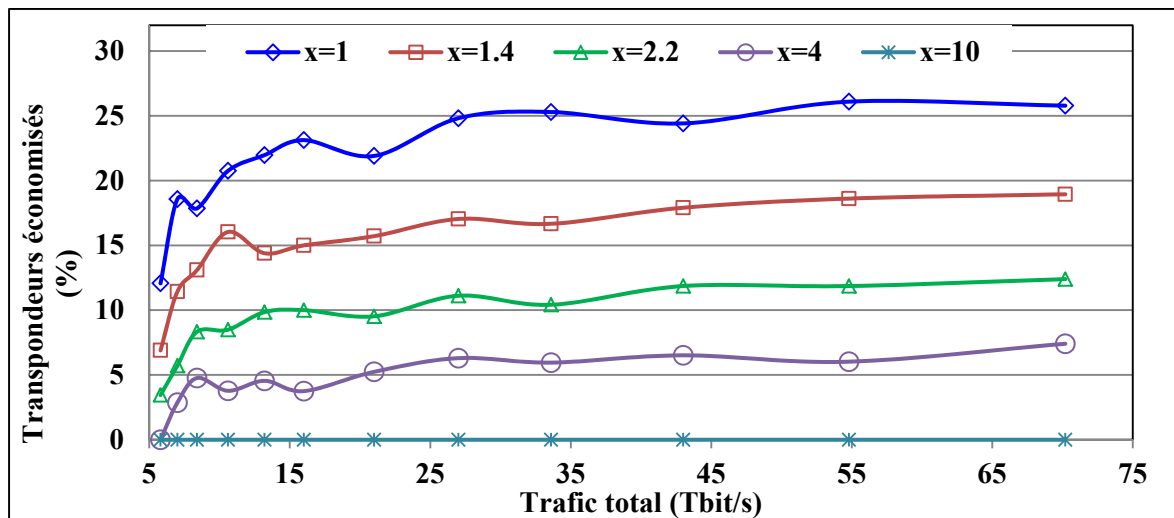


Figure 4.10 Pourcentage de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre du réseau *LH*

La Figure 4.11 et la Figure 4.12 représentent les économies en longueur d'onde (à la fois en nombre et en pourcentage) de la solution sans filtre LH pour les différentes variations quotidiennes de trafic. Il est évident que les gains en longueur d'onde augmentent avec les variations élevées de trafic. La Figure 4.11 représente le total des économies en longueur d'onde, qui correspond à la différence entre le nombre total de longueurs d'onde nécessaires dans une solution sans filtre avec un trafic fixe et le nombre total de longueurs d'onde dans une solution sans filtre avec un trafic dynamique. De la Figure 4.12, 5 % à 23 % des longueurs d'onde peuvent être économisées lorsque x varie entre 1,4 et 2,2.

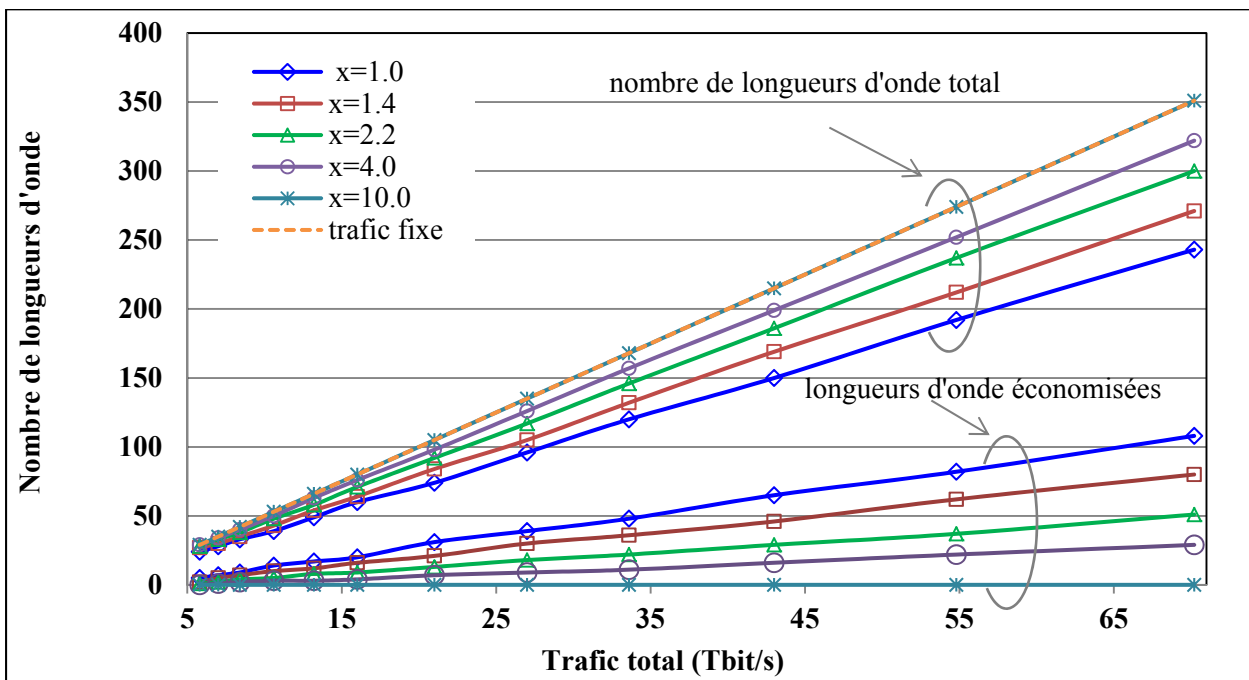


Figure 4.11 Nombre de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre du réseau
LH

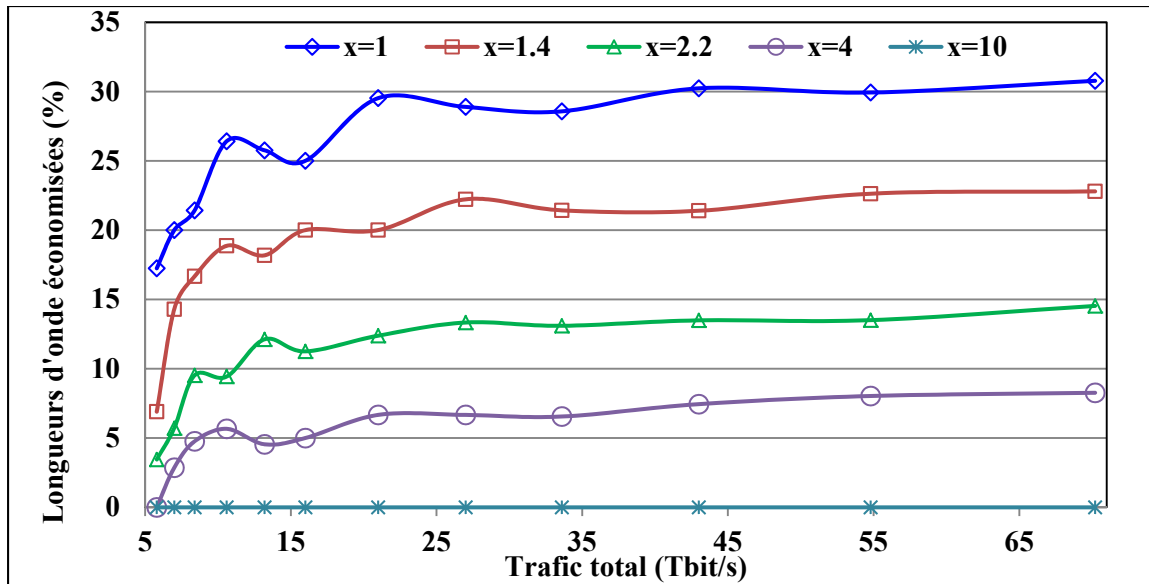


Figure 4.12 Pourcentage de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre du réseau *LH*

4.3.2.2 Réseau sous-marin régional

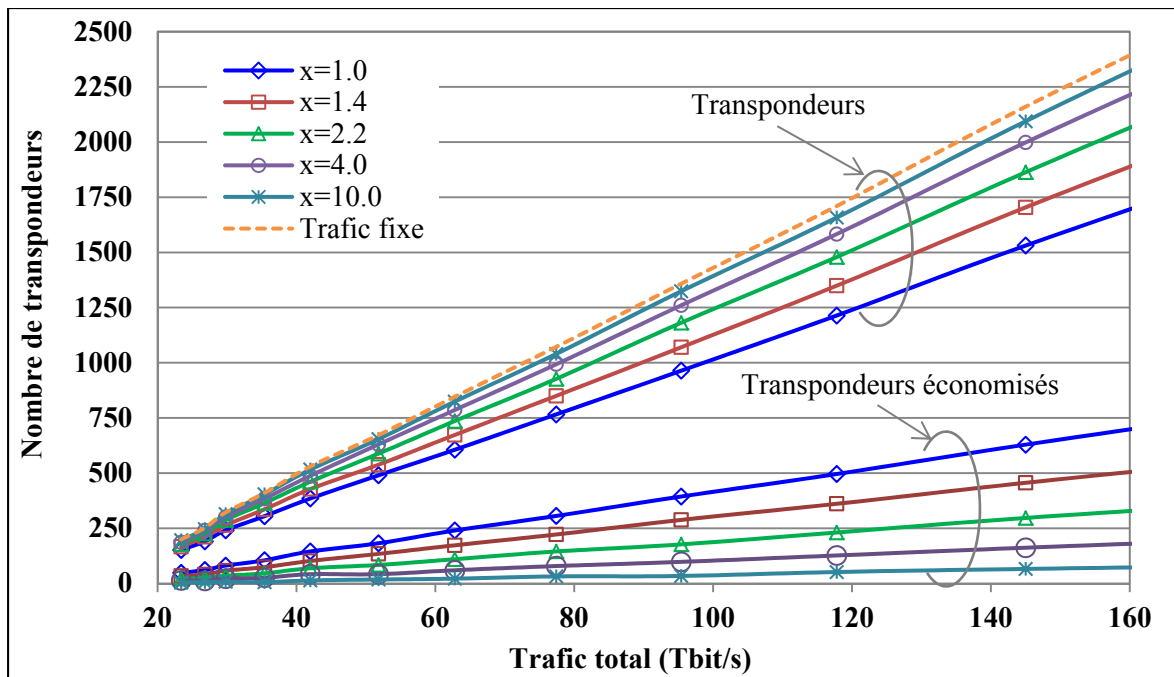


Figure 4.13 Nombre de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre avec régénération du réseau régional

À la Figure 4.13 et à la Figure 4.14, les économies de transpondeurs (à la fois en nombre et en pourcentage) sont présentés pour les différentes variations quotidiennes de trafic (Figure 4.8). La Figure 4.13 montre les résultats pour le scénario de trafic lorsque toutes les demandes du réseau régional (Figure 3.8) sont régénérées aux nœuds 5, 9 et 11. La Figure 4.13 compare le nombre maximum de transpondeurs nécessaires pour les deux cas en étude (avec et sans trafic dynamique). De la Figure 4.14, on voit que 10 % à 21 % des transpondeurs peuvent être économisés lorsque x varie entre 1,4 et 2,2.

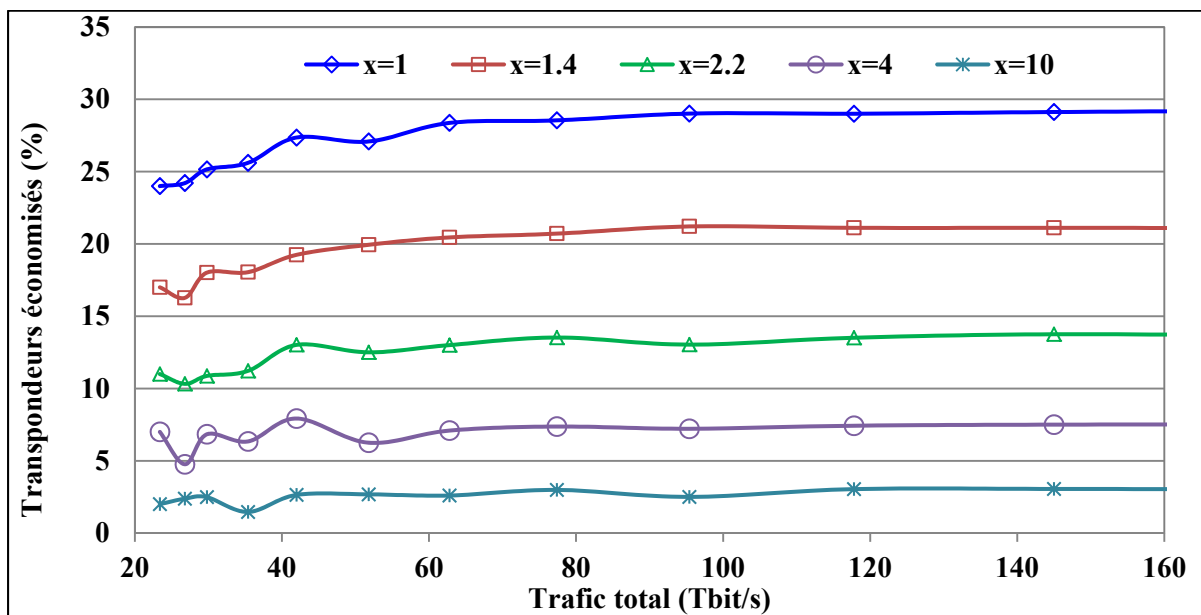


Figure 4.14 Pourcentage de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre avec régénération du réseau régional

La Figure 4.15 montre les résultats pour le scénario de trafic lorsque toutes les demandes traversent les nœuds 5, 9 et 11 de la Figure 3.8 sans régénération. Bien que ce ne soit pas un cas réaliste, la simulation a été effectuée pour montrer la limite en termes d'économies. De la Figure 4.16, 9 % à 15 % des transpondeurs peuvent être économisés lorsque x varie entre 1,4 et 2,2. De la Figure 4.13 et de la Figure 4.15, les économies pour les réseaux avec des stations de régénération sont plus élevées que les économies pour les réseaux sans station de

régénération. En effet, pour chaque transpondeur économisé, deux autres transpondeurs peuvent être économisés au niveau des nœuds intermédiaires à chaque site de régénération.

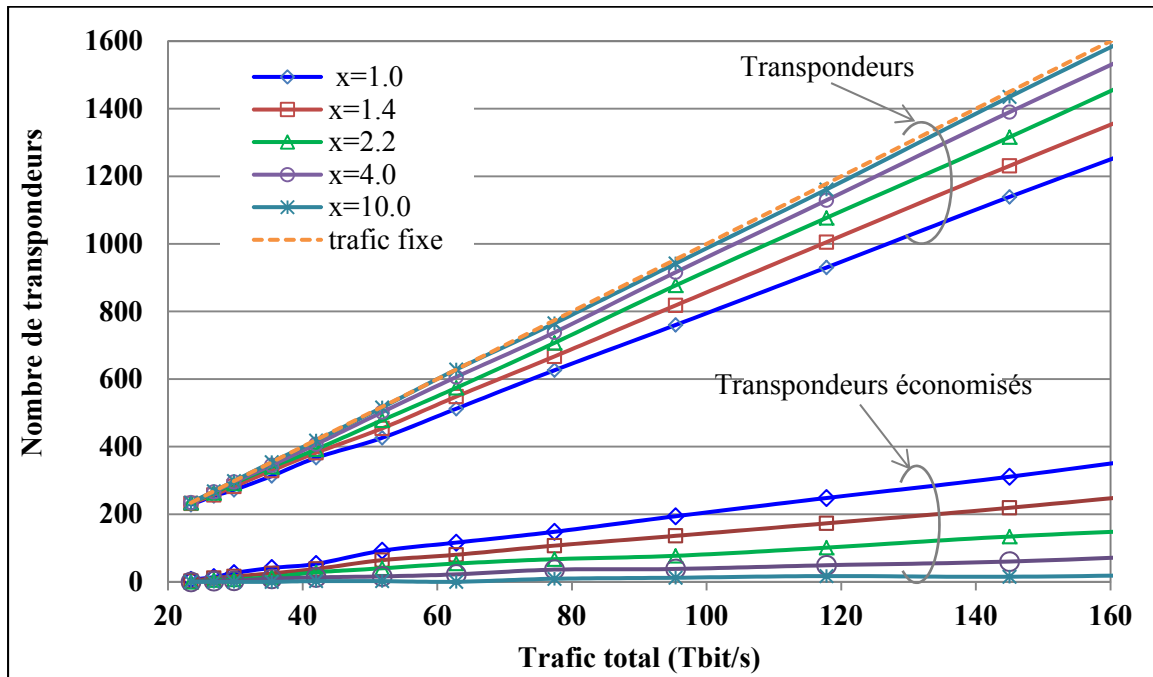


Figure 4.15 Nombre de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre sans régénération du réseau régional

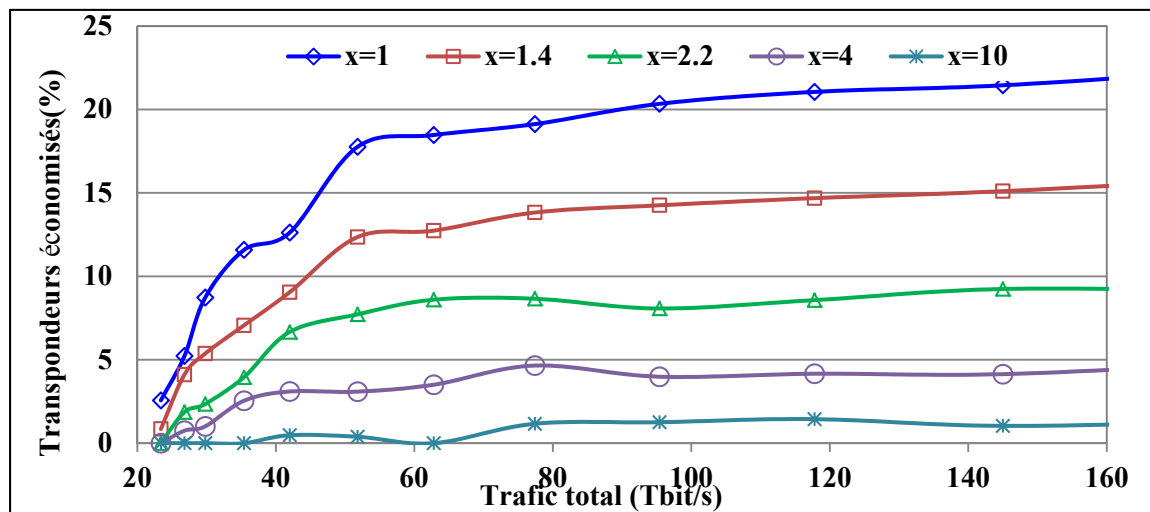


Figure 4.16 Pourcentage de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre sans régénération du réseau régional

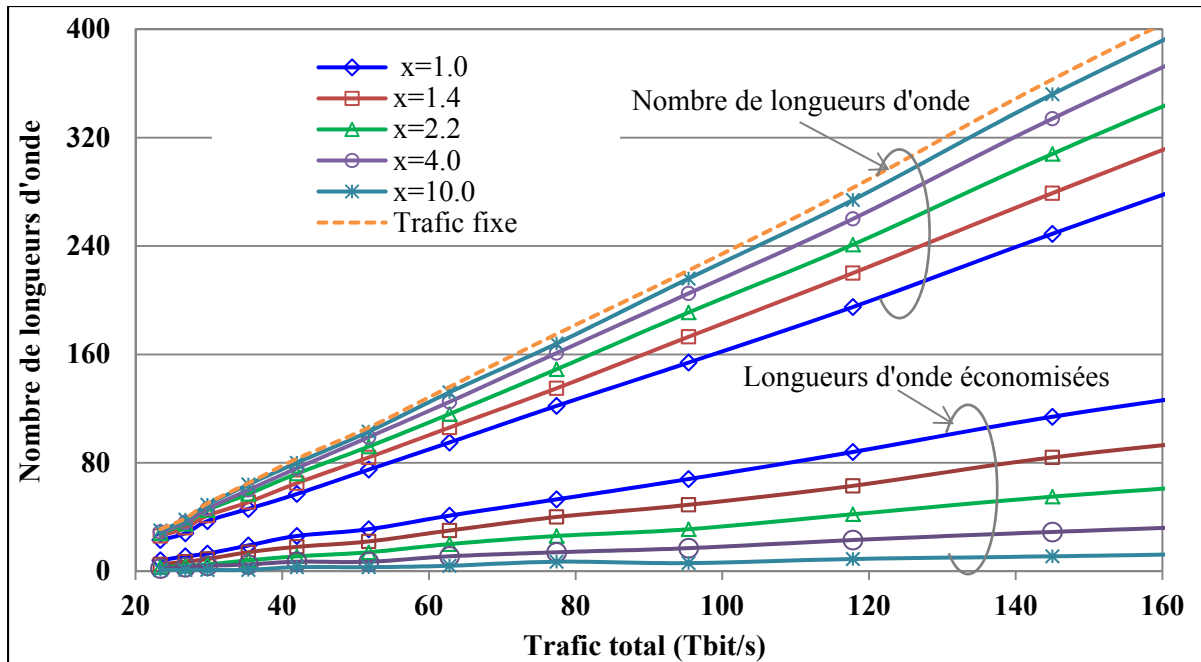


Figure 4.17 Nombre de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre avec régénération du réseau régional

La Figure 4.19 et la Figure 4.17 représentent les gains en longueur d'onde (à la fois en nombre et en pourcentage) de la solution sans filtre pour les différentes variations de trafic quotidiennes (Figure 4.8). La Figure 4.17 montre les résultats pour le scénario de trafic lorsque toutes les demandes sont régénérées aux nœuds 5, 9 et 11. La Figure 4.17 représente le total des économies en longueur d'onde. De la Figure 4.18, on voit que 10 % à 23 % des longueurs d'onde peuvent être économisées lorsque x varie entre 1,4 et 2,2.

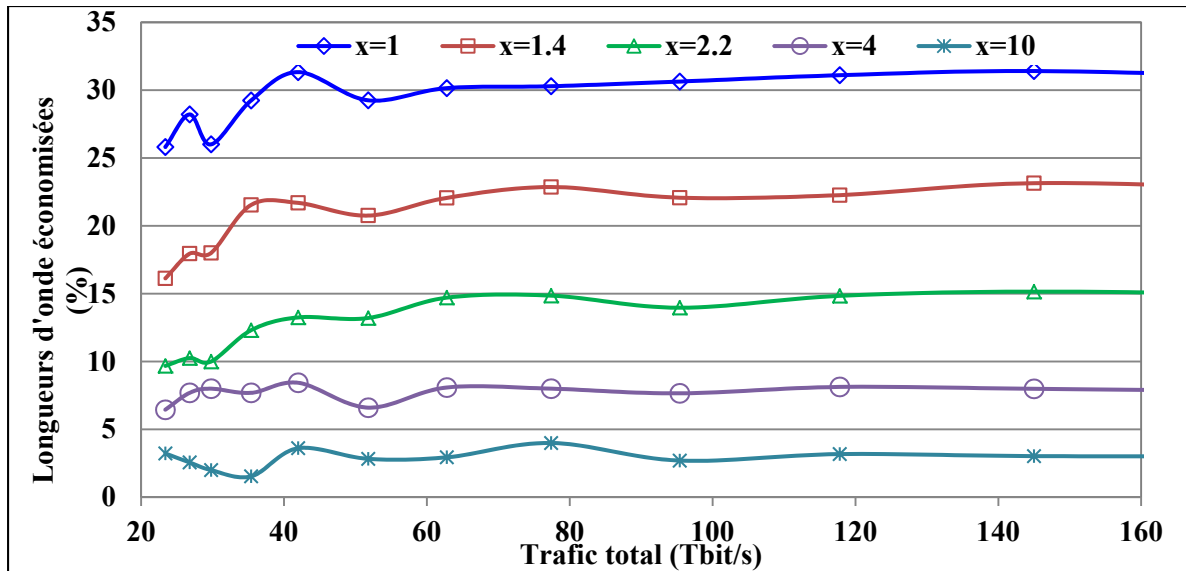


Figure 4.18 Pourcentage de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre avec régénération du réseau régional

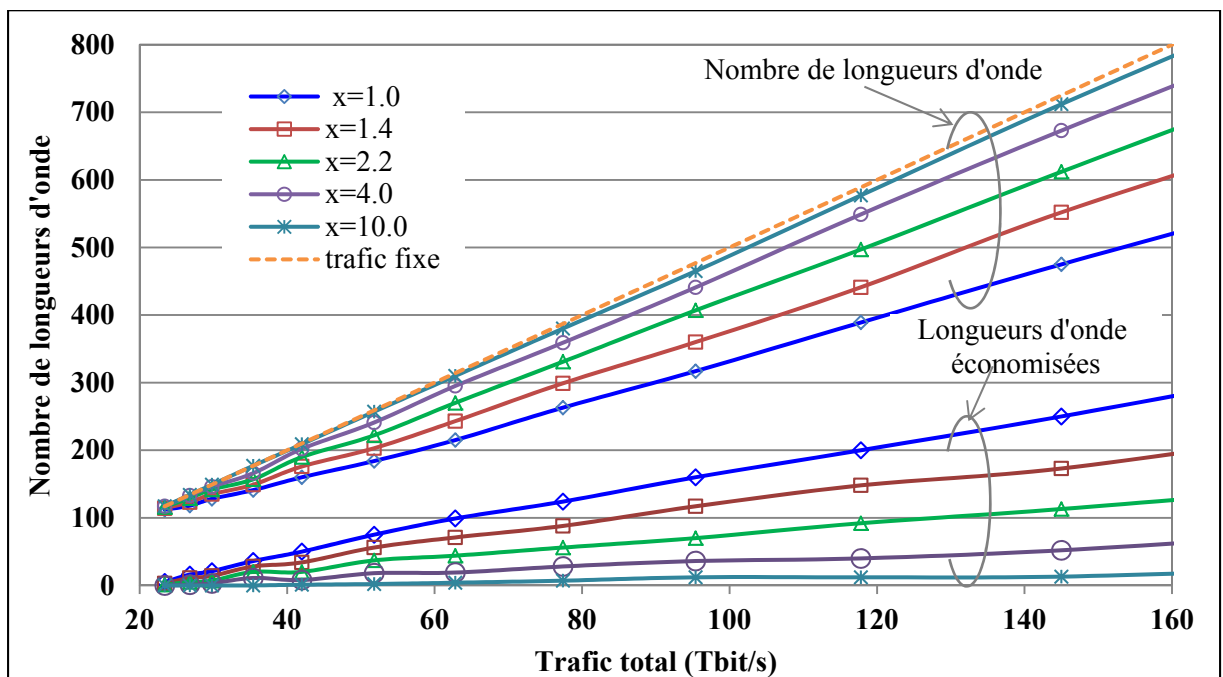


Figure 4.19 Nombre de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre sans régénération du réseau régional

À la Figure 4.19, le nombre de longueurs d'onde nécessaires pour supporter le trafic est plus élevé que le nombre à la Figure 4.17. En effet, lorsque le trafic n'est pas régénéré, les longueurs d'onde sont consommées plus rapidement. À la Figure 4.19, l'économie en nombre de longueurs d'onde est plus élevée. En effet, dans le scénario où le signal est régénéré au niveau des nœuds 5, 9 et 11, il existe quatre arbres de fibre, et une longueur d'onde ne peut être économisée que si elle est économisée sur les quatre arbres de fibre en même temps. D'autre part, dans le scénario sans régénération, il y'a un seul arbre de fibre, alors une longueur d'onde est économisée quand elle est économisée uniquement sur cet arbre de fibre.

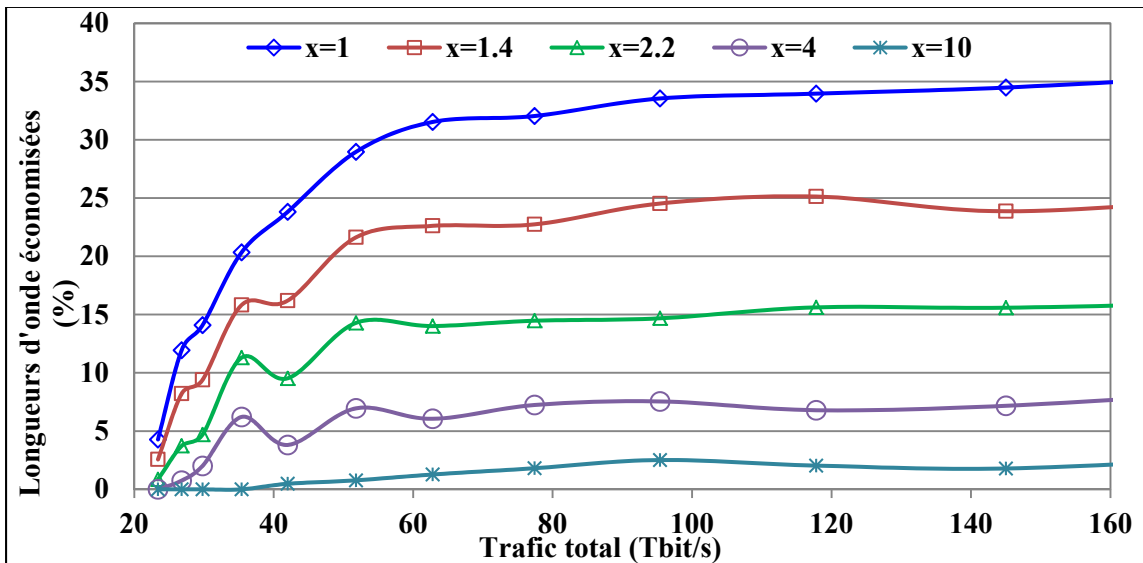


Figure 4.20 Pourcentage de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre sans régénération du réseau régional

4.3.2.3 Réseau sous-marin en anneau

Dans la Figure 4.21 et la Figure 4.23, les économies de transpondeurs sont présentées pour les différentes variations quotidiennes de trafic (Figure 4.8). La Figure 4.21 montre les résultats pour le scénario de trafic lorsque les demandes sont régénérées aux nœuds (1 et 7) pour la première paire de fibres et aux nœuds (4 et 9) pour la deuxième paire de fibres de la Figure 3.14. La Figure 4.21 compare le nombre maximum de transpondeurs nécessaires pour

les deux cas en étude (avec et sans variations de trafic). De la Figure 4.22, on peut voir que 5 % à 14 % des transpondeurs peuvent être économisés lorsque x varie entre 1,4 et 2,2.

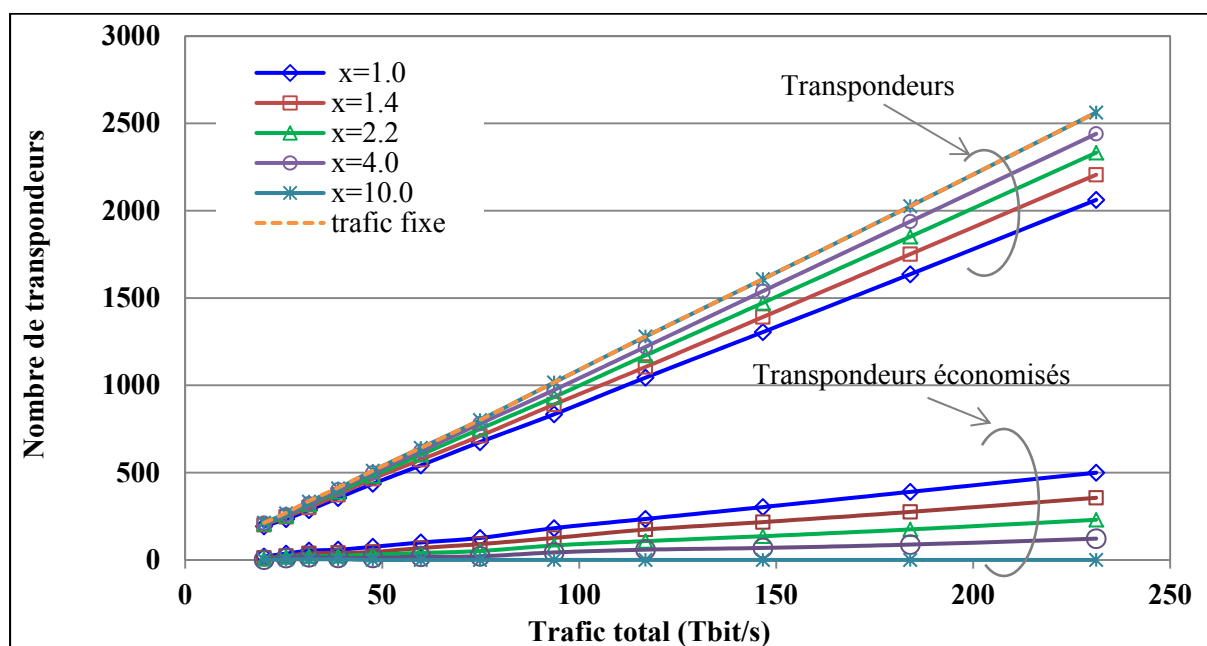


Figure 4.21 Nombre de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre avec 2 régénérateurs par paire de fibres du réseau en anneau

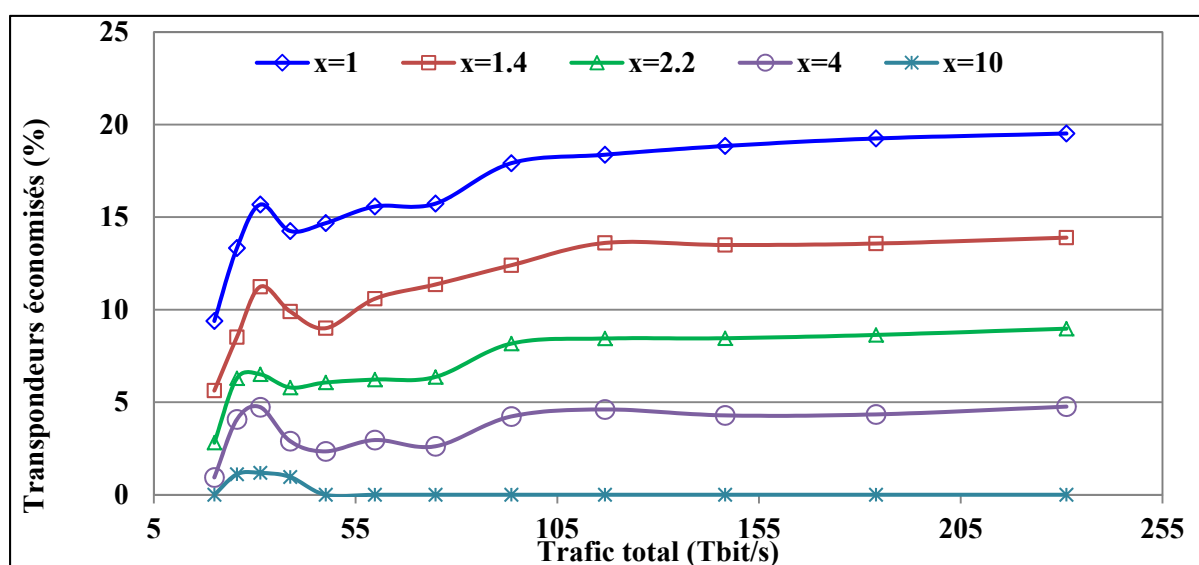


Figure 4.22 Pourcentage de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre avec 2 régénérateurs par paire de fibres du réseau en anneau

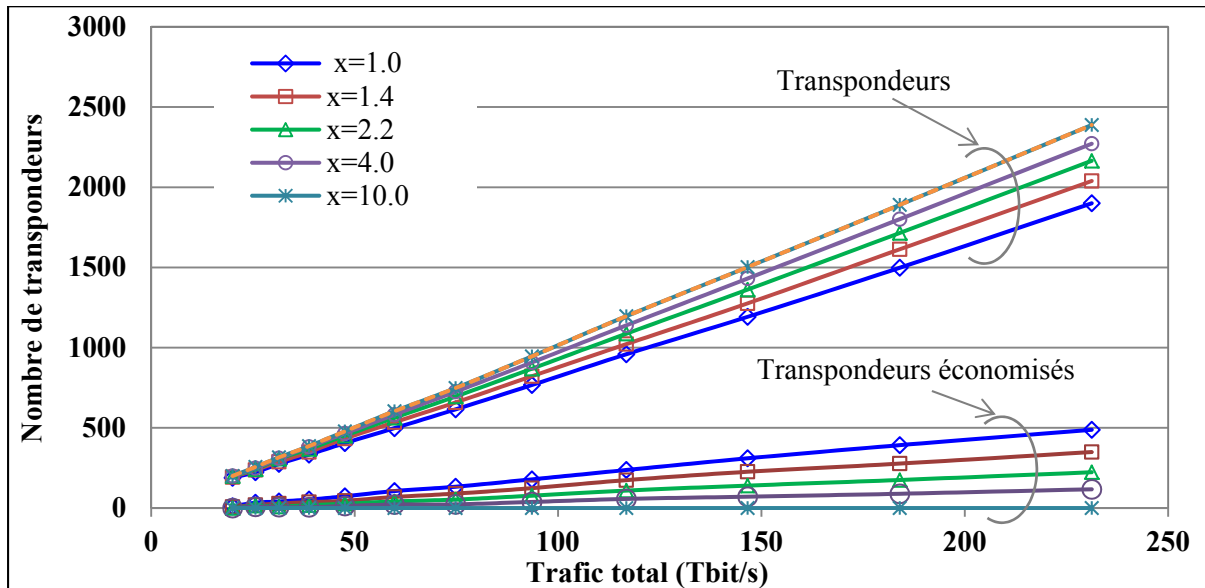


Figure 4.23 Nombre de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre sans régénération du réseau en anneau

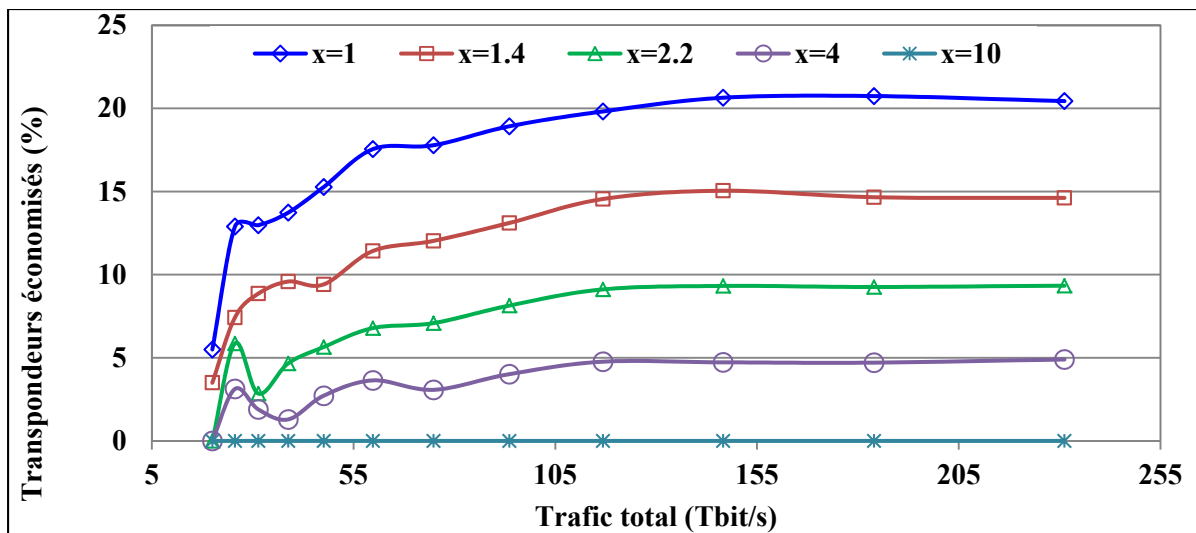


Figure 4.24 Pourcentage de transpondeurs économisés pour la solution sans filtre sans régénération du réseau en anneau

La Figure 4.23 montre les résultats pour le scénario de trafic lorsque les demandes ne sont pas régénérées pour le réseau de la Figure 3.15. La Figure 4.23 compare le nombre maximum de transpondeurs nécessaires pour les deux cas en étude (avec et sans variations de trafic). On

remarque aussi que le nombre de transpondeurs est légèrement moins que le nombre de transpondeurs de la solution précédente, car cela est dû à l'absence de régénérateurs au niveau de ce réseau. De la Figure 4.24, on voit que 5 % à 15 % des transpondeurs peuvent être économisés lorsque x varie entre 1,4 et 2,2.

La Figure 4.25 et la Figure 4.27 représentent les gains en longueur d'onde de la solution sans filtre pour les différentes variations quotidiennes de trafic indiquées à la Figure 4.8 lorsque le décalage horaire entre les nœuds est pris en compte. Il est évident que les économies en longueur d'onde augmentent avec l'amplitude des variations élevées de trafic. La Figure 4.25 montre les résultats pour le scénario de trafic lorsque les demandes sont régénérées aux nœuds (1 et 7) pour la première paire de fibres et (4 et 9) pour la deuxième paire de fibres de la Figure 3.14. La Figure 4.25 représente le total des économies en longueur d'onde, qui a été obtenu en calculant la différence entre le nombre total de longueurs d'onde nécessaires dans une solution sans filtre avec un trafic statique et le nombre total de longueurs d'onde nécessaires dans une solution sans filtre avec un trafic dynamique. De la Figure 4.26, on voit que 5 % à 20 % des longueurs d'onde peuvent être économisées lorsque x varie entre 1,4 et 2,2.

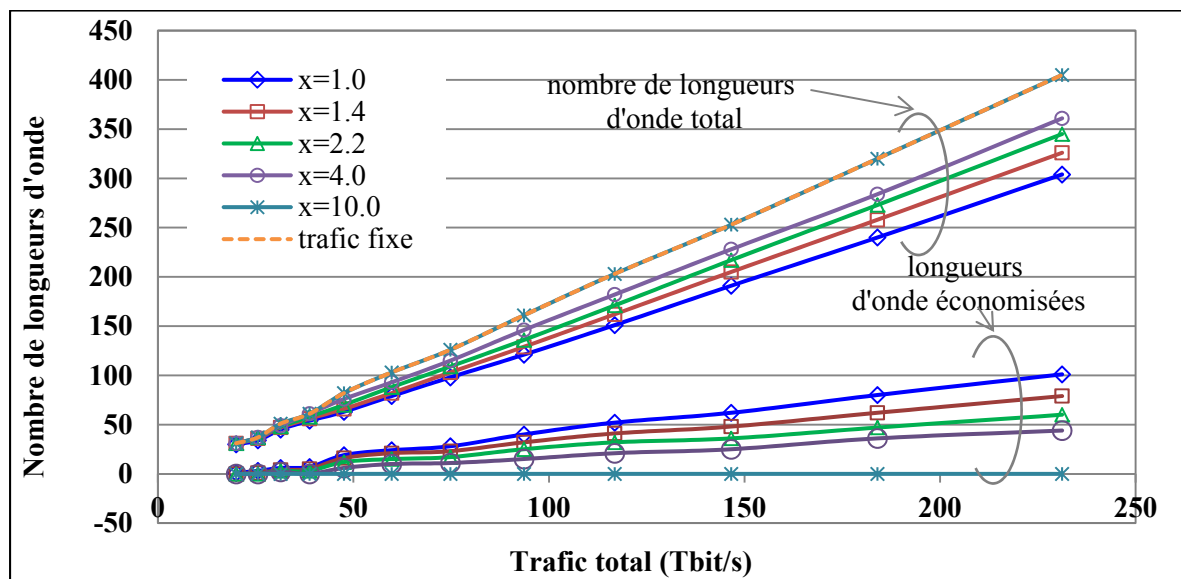


Figure 4.25 Nombre de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre avec 2 stations de régénération par paire de fibres du réseau en anneau

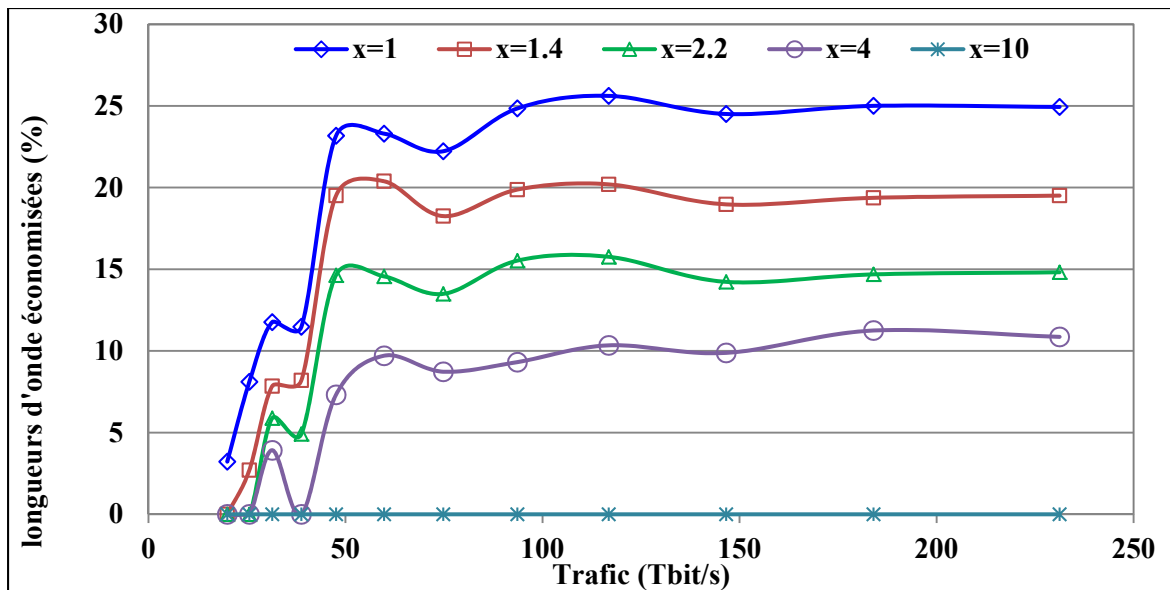


Figure 4.26 Pourcentage de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre avec 2 stations de régénération par paire de fibres du réseau en anneau

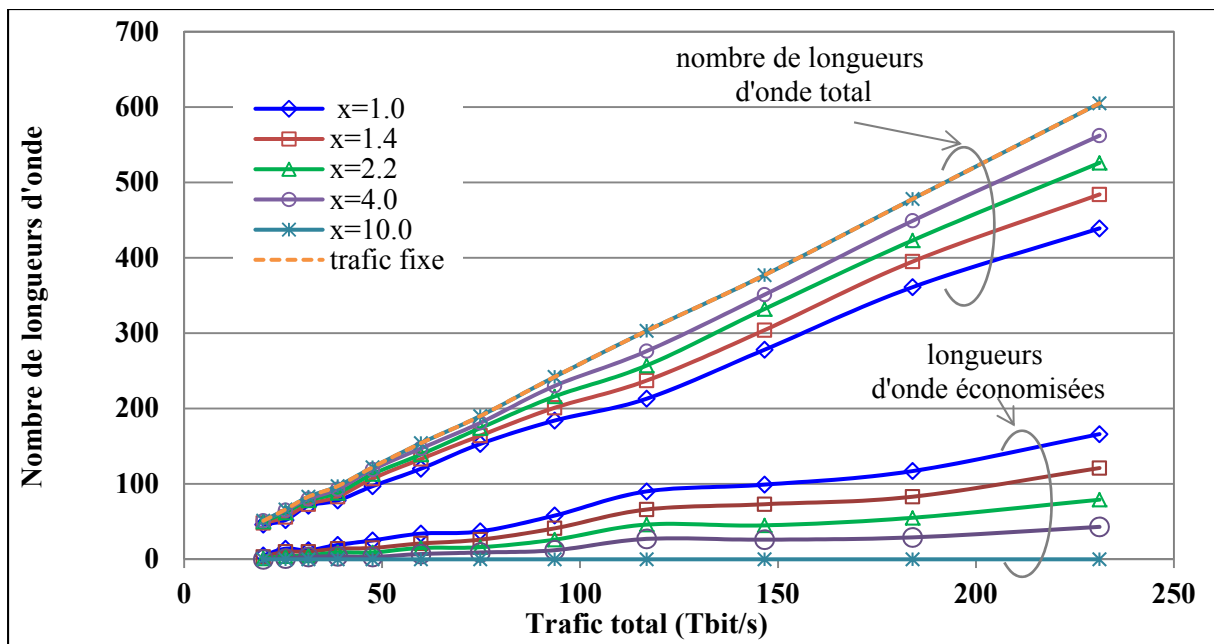


Figure 4.27 Nombre de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre sans régénération du réseau en anneau

La Figure 4.27 montre les résultats pour le scénario de trafic lorsque les demandes ne sont pas régénérées pour le réseau de la Figure 3.15. À noter que pour cette solution les bloqueurs de longueurs d'onde n'ont pas été pris en considération, d'où le nombre élevé de longueurs d'onde. La Figure 4.27 représente le total des économies en longueur d'onde, qui a été obtenu en calculant la différence entre le nombre total de longueurs d'onde nécessaires dans une solution sans filtre avec un trafic statique et le nombre total de longueurs d'onde nécessaires dans une solution sans filtre avec un trafic dynamique. De la Figure 4.28, on voit que 5 % à 20 % des longueurs d'onde peuvent être économisées lorsque x varie entre 1,4 et 2,2.

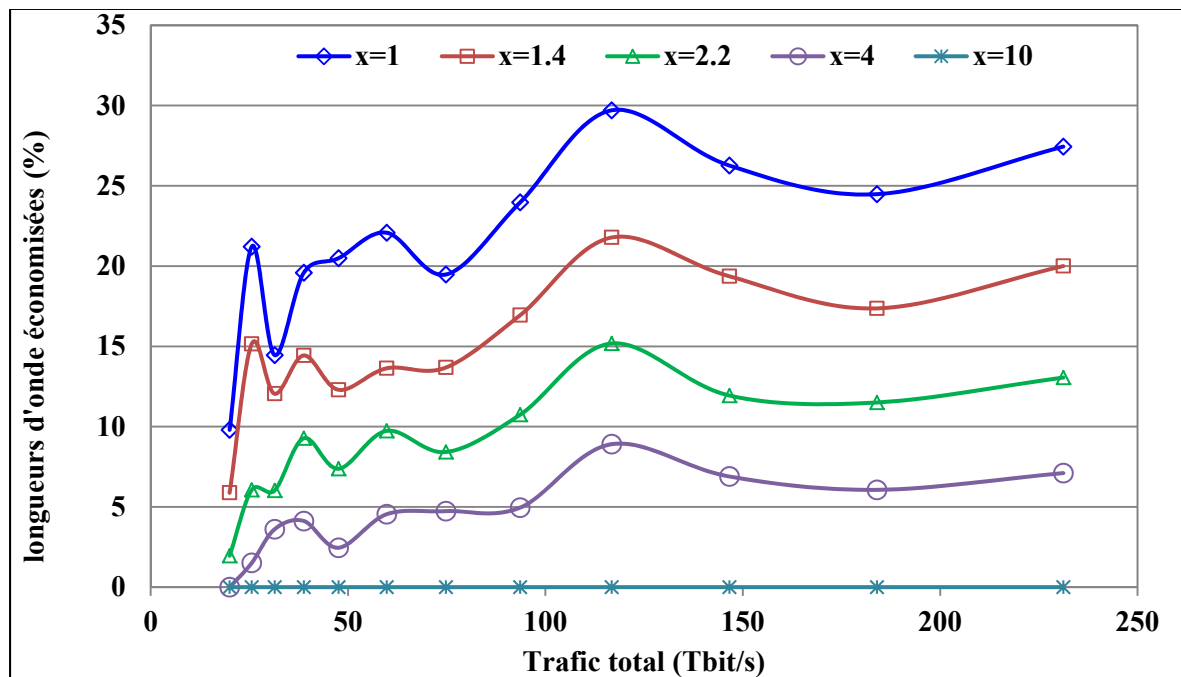


Figure 4.28 Pourcentage de longueurs d'onde économisées pour la solution sans filtre sans régénération du réseau en anneau

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, l'agilité d'un réseau sans filtre a été démontrée dans une situation de trafic dynamique. Les résultats des économies en transpondeurs et en longueurs d'onde des solutions conventionnelles et sans filtre ont été exposés pour chacune de trois topologies des

réseaux sous-marins étudiés (*long haul*, régional et en anneau). Les résultats montrent que l'architecture sans filtre peut apporter d'importantes économies pour les terminaux pour des scénarios de trafic avec une grande variation d'amplitude, sans perte d'agilité et sans changer d'équipement. Jusqu'à 30 % de transpondeurs optiques et 35 % de longueurs d'onde peuvent être économisés en utilisant l'agilité des réseaux sous-marins sans filtre couvrant différents fuseaux horaires. Les résultats montrent que l'architecture de réseau optique sans filtre représente une solution prometteuse pour les réseaux optiques sous-marins.

CONCLUSION

Dans ce projet, des solutions sans filtre ont été proposées pour trois topologies sous-marines (*long haul*, régionale et en anneau). L'étude consistait à adapter la plateforme de conception et de simulation des réseaux sans filtre pour des applications sous-marines. Des analyses comparatives avec des réseaux conventionnels ont été faites en termes de coûts, consommation de longueur d'onde (RWA) et de spectre (RSA).

Les résultats ont montré que les solutions sans filtre présentent un net avantage au niveau des coûts. En effet, l'économie des coûts d'une solution sans filtre avec une seule paire de fibres peut atteindre 37 % pour les équipements terminaux et 12 % pour l'équipement de ligne pour la topologie *long haul*. Dans le cas du réseau en anneau les stations de régénération sont prises en compte, l'économie au niveau des terminaux peut atteindre 70 %.

L'étude de l'évolution de la consommation de longueurs d'onde pour plusieurs périodes a montré que les solutions sans filtre avec trois paires de fibres, pour les topologies *long haul* et régionale, ont une consommation du même ordre que les solutions conventionnelles. Les résultats ont montré aussi que le passage vers une grille élastique se fait à un coût quasi nul, contrairement aux solutions conventionnelles et permettent de réduire la consommation du spectre de 15 % à 25 %.

Dans cette étude, un modèle d'assignation dynamique des transpondeurs et du spectre a été proposé, le décalage horaire entre les nœuds terrestres d'un réseau très étendu a été exploité afin d'effectuer une allocation dynamique des transpondeurs et des longueurs d'onde.

Les résultats ont montré que 5 % à 20 % des transpondeurs et des longueurs d'onde peuvent être économisés par l'exploitation de l'agilité des réseaux sous-marins sans filtre qui couvrent plusieurs fuseaux horaires. Ces résultats montrent que l'architecture de réseau

optique sans filtre représente une solution prometteuse pour les réseaux optiques sous-marins futurs.

Les recherches futures devront approfondir l'étude des réseaux sous-marins sans filtre en effectuant la même étude pour les réseaux maillés. Il faudra notamment vérifier que les outils tels qu'adaptés peuvent traiter des topologies physiques avec des variétés plus importantes de solutions possibles, afin de s'assurer qu'elles sont valides dans un contexte sous-marin. Il serait intéressant aussi de tester l'agilité des réseaux sans filtre, introduite au chapitre 4, avec des données réelles de trafic et concevoir une plateforme de simulation en temps réel avec une plateforme de contrôle pour comparer le comportement du réseau et améliorer l'algorithme en conséquence.

ANNEXE I

EXEMPLE DE L'EN-TÊTE D'UN FICHIER CSV DE L'INTERFACE D'INTÉGRATION DE DONNÉES

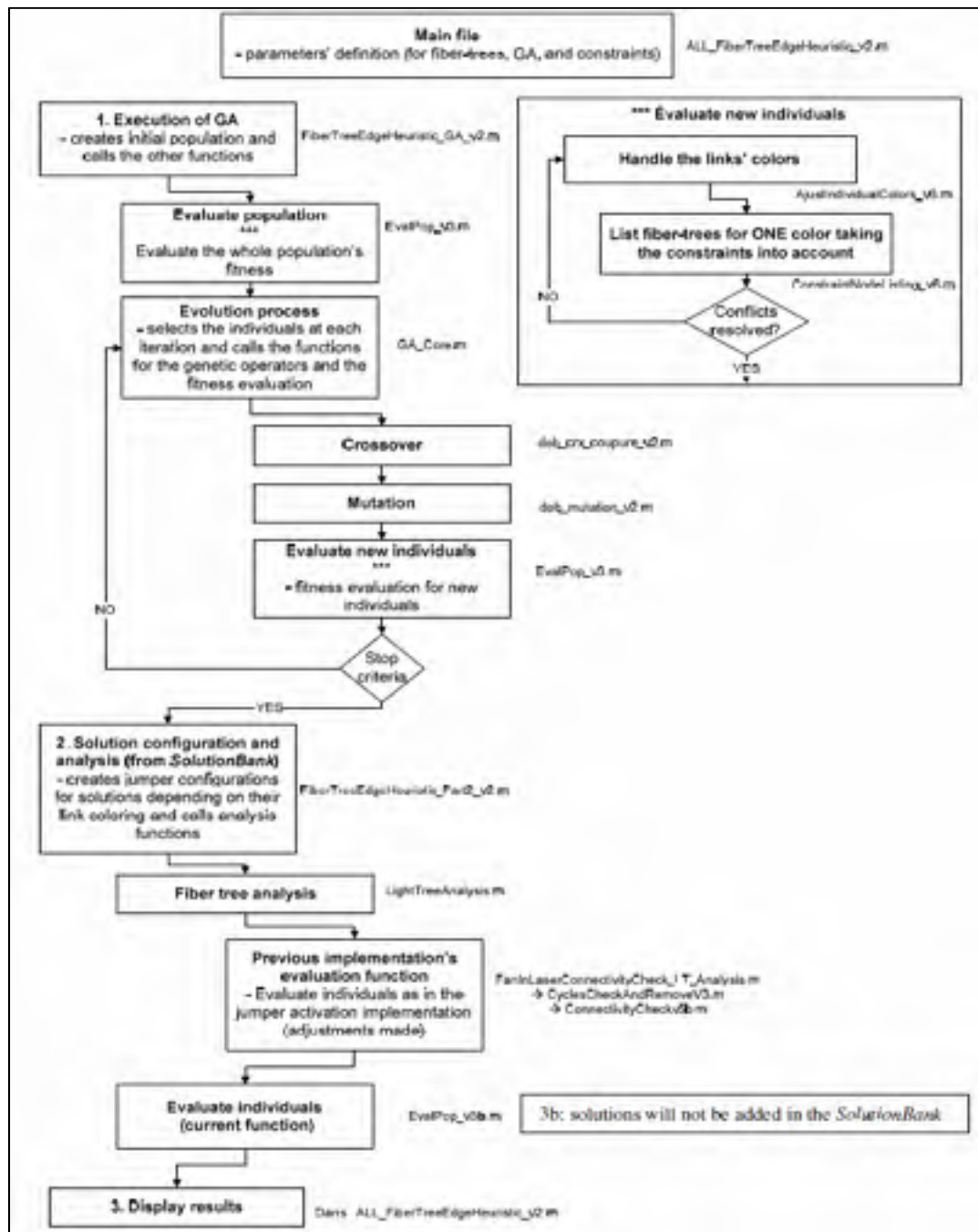
NetCalcID,Source Service Platform Name,Dest Service Platform Name,Site Source
Name,Site Dest Name,Demand Type,Class Of Service,Period 1 Size,Period 2 Size,Period 3
Size,Period 4 Size,Period 5 Size,Period 6 Size,Period 7 Size,Period 8 Size,Period 9
Size,Period 10 Size,Period 11 Size,Period 12 Size,Period 13 Size,Customer,Note 1,Note 2

,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,

1,B1,B2,B1,B2,10G,Unprotected,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,,
2,B1,B3,B1,B3,10G,Unprotected,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,,
3,B1,B4,B1,B4,10G,Unprotected,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,,
4,B1,B5,B1,B5,10G,Unprotected,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,,
5,B1,B6,B1,B6,10G,Unprotected,6,6,6,6,6,6,6,6,6,6,6,6,,
6,B2,B1,B2,B1,10G,Unprotected,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,,
7,B2,B3,B2,B3,10G,Unprotected,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,,
8,B2,B4,B2,B4,10G,Unprotected,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,,
9,B2,B5,B2,B5,10G,Unprotected,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,,
10,B2,B6,B2,B6,10G,Unprotected,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,,
11,B3,B1,B3,B1,10G,Unprotected,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,,
12,B3,B2,B3,B2,10G,Unprotected,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,,
13,B3,B4,B3,B4,10G,Unprotected,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,,
14,B3,B5,B3,B5,10G,Unprotected,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,,
15,B3,B6,B3,B6,10G,Unprotected,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,,
16,B4,B1,B4,B1,10G,Unprotected,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,,
17,B4,B2,B4,B2,10G,Unprotected,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,,
18,B4,B3,B4,B3,10G,Unprotected,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,,

ANNEXE II

A II-1 schéma de l'algorithme d'interconnexion d'arbre avec les programmes matlab® associés
Tiré de O'Brien (2008)



LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Andreas Betker, Christoph Gerlach, Ralf Hülsermann, Monika Jäger, . 2003. « Reference Transport Network Scenarios ».
- Archambault, Émile, Daniel O'Brien, Christine Tremblay, François Gagnon, Michel P. Bélanger et Éric Bernier. 2010. « Design and Simulation of Filterless Optical Networks: Problem Definition and Performance Evaluation ». *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 2, n° 8, p. 496-501.
- Bergano, Neal S. 2005. « Wavelength division multiplexing in long-haul transoceanic transmission systems ». *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 23, n° 12, p. 4125-4139.
- Cai, J. X., H. Zhang, H. G. Batshon, M. Mazurczyk, O. V. Sinkin, D. G. Foursa, A. N. Pilipetskii, G. Mohs et N. S. Bergano. 2014. « 200 Gb/s and Dual Wavelength 400 Gb/s Transmission over Transpacific Distance at 6.0 b/s/Hz Spectral Efficiency ». *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 32, n° 4, p. 832-839.
- Cassidy, Andrew Michael. 2012. « Performance dynamique de réseaux optiques dans filtre : ressources réseau et qualité de transmission ». Montréal, École de technologie supérieure, 186 p.
- Collings, B. 2013. « New devices enabling software-defined optical networks ». *Communications Magazine, IEEE*, vol. 51, n° 3, p. 66-71.
- Dayou, Qian, Huang Ming-Fang, Zhang Shaoliang, P. Nan Ji, Shao Yin, F. Yaman, E. Mateo, Wang Ting, Y. Inada, T. Ogata et Y. Aoki. 2011. « Transmission of 115 Gb/s 100G PDM-8QAM-OFDM channels with 4bits/s/Hz spectral efficiency over 10,181km ». In *Optical Communication (ECOC), 2011 37th European Conference and Exhibition on*. (18-22 Sept. 2011), p. 1-3.
- Friskén, S., G. Baxter, D. Abakoumov, Zhou Hao, I. Clarke et S. Poole. 2011. « Flexible and grid-less wavelength selective switch using LCOS technology ». In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference*. (6-10 March 2011), p. 1-3.
- Gerstel, O., M. Jinno, A. Lord et S. J. B. Yoo. 2012. « Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer? ». *Communications Magazine, IEEE*, vol. 50, n° 2, p. s12-s20.

- Gringeri, S., B. Basch, V. Shukla, R. Egorov et T. J. Xia. 2010. « Flexible architectures for optical transport nodes and networks ». *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, n° 7, p. 40-50.
- Infinera. 2012. *Coherent DWDM Technologies*.
- « Internet2 Network NOC ». 2015. < <http://noc.net.internet2.edu/> >.
- Google Patents. 2015. *Reconfigurable branching unit for submarine optical communication networks*. < <https://www.google.com/patents/US8989197> >.
- Ji, Philip. 2013. « Reconfigurable Switching Technologies in Optical Networks: From Core to Submarine to Data Centers ». In *Asia Communications and Photonics Conference 2013*. (Beijing, 2013/11/12), p. AF4F.1. Coll. « OSA Technical Digest (online) »: Optical Society of America.
< <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ACPC-2013-AF4F.1> >.
- Ji, Philip N., Yoshiaki Aono et Ting Wang. 2010. « Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer Based on Bidirectional Wavelength Selective Switches ». In *Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics and Photonics in Switching*. (Monterey, California, 2010/07/25), p. PWB1. Coll. « OSA Technical Digest (CD) »: Optical Society of America.
< <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=PS-2010-PWB1> >.
- Leven, A., N. Kaneda et S. Corteselli. 2010. « Real-time implementation of digital signal processing for coherent optical digital communication systems ». *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 16, n° 5, p. 1227-1234.
- Mantelet, Guillaume, Andrew Cassidy, Christine Tremblay, David V. Plant, Paul Littlewood et Michel P. Bélanger. 2013. « Establishment of Dynamic Lightpaths in Filterless Optical Networks ». *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, n° 9, p. 1057-1065.
- O'Brien, Daniel, Benoît Châtelain, François Gagnon, Christine Tremblay, Michel P. Bélanger et Éric Bernier. 2008. « A Dual Metaheuristic Solution to the Min-RWA Problem ». In *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference*. (San Diego, California, 2008/02/24), p. JThA80. Coll. « OSA Technical Digest (CD) »: Optical Society of America.
< <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=NFOEC-2008-JThA80> >.
- O'Brien, Daniel. 2008. *ROUTING ASSIGNMENT IN FILTERLESS NETWORKS (Link coloring algorithms)*. École de technologie supérieure.

- Pilipetskii, A. 2015. « High capacity submarine transmission systems ». In *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2015*. (22-26 March 2015), p. 1-33.
- Pradhan, S., B. Patnaik, S. K. Rout et R. K. Panigrahy. 2015. « All optical equalizers in fiber optic link ». In *Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO), 2015 International Conference on*. (24-25 Jan. 2015), p. 1-3.
< <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7253826>
- Rambach, F., B. Konrad, L. Dembeck, U. Gebhard, M. Gunkel, M. Quagliotti, L. Serra et V. Lopez. 2013. « A multilayer cost model for metro/core networks ». *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, vol. 5, n° 3, p. 210-225.
- Salsi, M., C. Koebele, P. Tran, H. Mardoyan, S. Bigo et G. Charlet. 2010. « 80×100-Gbit/s transmission over 9,000km using erbium-doped fibre repeaters only ». In *Optical Communication (ECOC), 2010 36th European Conference and Exhibition on*. (19-23 Sept. 2010), p. 1-3.
- Shapiro, S. 2013. « The Guide Session 2 – Network Design ». *SubOptic 2013*.
- Tipsuwannakul, E., Li Jianqiang, T. A. Eriksson, L. Egnell, F. Sjostrom, Johan Pejnefors, P. A. Andrekson et M. Karlsson. 2012. « Influence of fiber-Bragg grating-induced group-delay ripple in high-speed transmission systems ». *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, vol. 4, n° 6, p. 514-521.
- Tremblay, C, F Gagnon, B Châtelain, É Bernier et M Bélanger. 2007. « Filterless optical networks: a unique and novel passive WAN network solution ». In *12th optoelectronic and communications conference–16th international conference on integrated optics & optical fiber communication (OECC–IOOC 2007)*. p. 466-467.
- Tremblay, Christine, Émile Archambault, Michel P. Bélanger, Jean-Philippe Savoie, François Gagnon et David V. Plant. 2013. « Passive filterless core networks based on advanced modulation and electrical compensation technologies ». *Telecommun. Syst.*, vol. 54, n° 2, p. 167-181.
- Zhenyu, Xu, C. Tremblay, É. Archambault, M. Furdek, J. Chen, L. Wosinska, M. P. Bélanger et P. Littlewood. 2015. « Flexible Bandwidth Allocation in Filterless Optical Networks ». *Communications Letters, IEEE*, vol. 19, n° 4, p. 565-568.